

Grado en Ingeniería de Sistemas Audiovisuales
2018-2019

Trabajo Fin de Grado

**CONTRIBUCIONES A LA OBTENCIÓN
DE PARÁMETROS DE CALIDAD
OBJETIVOS EN LA VIOLA**

Josué Fernández Villegas

Tutora
Carmen Peláez Moreno
Junio 2019



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconoci-
miento - No Comercial - Sin Obra Derivada**

Resumen

En este proyecto se estudia la viola y sus características acústicas, con el fin de encontrar parámetros que determinen la calidad del instrumento, de una manera objetiva. Se realizará una búsqueda profunda en la literatura existente acerca de los instrumentos de arco, y se tomarán estudios científicos de autores como Helmholtz, Raman o Schelleng, entre otros.

Posteriormente, haciendo uso de la teoría de vibración por simpatía y del analizador espectral de tipo FFT, se llevarán a cabo tres grupos de experimentos. En primer lugar, se compararán el timbre y la respuesta en frecuencia de varios instrumentos de diferente tamaño y calidad. Después se visualizará la influencia que tiene la posición del puente en la respuesta de la viola. Por último, se mostrarán las consecuencias que tiene en el sonido un puente con defectos en su construcción.

Abstract

In this project, the viola and its acoustical characteristics are studied in order to find parameters which determine objectively the quality of the instrument. A deep research in the existing literature about the bowed instruments will be carried out, and scientific works by authors like Helmholtz, Raman or Schelleng among others will be taken into account.

Afterwards, taking advantage of the theory of sympathetic vibrations and the FFT spectral analyzer, three series of experiments will be performed. On the first place, the timbre and frequency response of different instruments of gradually increasing size and quality will be compared. After that, the influence of the position of the bridge in the response of the viola will be visualized. Finally, the consequences on the sound caused by a badly built bridge will be demonstrated.

Agradecimientos

Quisiera en primer lugar dar gracias a mis padres, que me han dado la vida, y que junto a mis hermanos han compartido conmigo todos estos años, apoyándome sin condiciones, con gran paciencia y cariño.

También gracias a Eva, que junto con tantos otros profesores me enseñó a amar este gran instrumento, y puso todo tipo de facilidades para que pudiera estudiar, aprender, y sobre todo, disfrutar.

Gracias a Carmen, que desde el primer momento creyó en este proyecto y se decidió a guiarme en esta aventura. Supo entender que esto era lo que realmente quería hacer, y sin pensárselo, no puso impedimento alguno en que terminara mis estudios desarrollando un proyecto que de verdad me apasionara.

Gracias a los músicos que pusieron a mi disposición su instrumento para poder realizar los ensayos. Sin ellos, parte de este trabajo no habría sido posible.

Y gracias a Mónica, que en todo momento ha sabido estar conmigo, en los buenos y en los malos momentos, ha sabido apoyarme y darme la fuerza necesaria para no rendirme.

*"To play a wrong note is insignificant, to play without passion is
inexcusable"*
L. V. Beethoven

Índice

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estructura del trabajo	2
2. Breve historia de la viola	6
2.1. Tres preguntas como punto de partida	6
2.2. Grandes constructores	11
2.3. El papel de la viola en la música	15
3. El instrumento, partes y tesitura	19
3.1. La viola	19
3.2. El arco	22
3.3. Tesitura	23
4. La viola como circuito eléctrico	27
4.1. Circuito equivalente	28
4.2. Las resonancias del cuerpo y el aire contenido en la caja . . .	33
4.3. Combinación de ambos modos propios	34
4.4. Conclusiones	36
5. Estudio de los modos propios	39
5.1. Métodos modernos de análisis	43
5.2. Simulación por el método de elementos finitos	45
5.3. Reflexiones	49
6. El tono del lobo	53
6.1. Marco teórico	54
6.2. Caracterización del fenómeno	57
6.3. Susceptibilidad y control	60
7. Estudio del timbre e intercomparación	64
7.1. El timbre y la calidad del tono	64
7.2. Descripción del ensayo y justificación teórica	69
7.3. Intercomparación del timbre de distintos instrumentos	73
7.3.1. Cuerda de Do	74
7.3.2. Cuerda de Sol	78

7.3.3.	Cuerda de Re	81
7.3.4.	Cuerda de La	85
7.3.5.	Conclusiones del ensayo	90
8.	Estudio de la influencia del puente	93
8.1.	Estructura y función	93
8.2.	Influencia de la posición	99
8.2.1.	Cuerda de Do	101
8.2.2.	Cuerda de Sol	105
8.2.3.	Cuerda de Re	108
8.2.4.	Cuerda de La	111
8.2.5.	Conclusiones del ensayo	114
8.3.	Influencia de imperfecciones en el apoyo de los pies	115
8.3.1.	Cuerda de Do	116
8.3.2.	Cuerda de Sol	120
8.3.3.	Cuerda de Re	123
8.3.4.	Cuerda de La	127
8.3.5.	Conclusiones del ensayo	130
9.	Conclusiones	133
9.1.	Objetivos cumplidos	133
9.2.	Líneas futuras	134
10.	Marco regulador	139
11.	Entorno socio-económico	143
11.1.	Presupuesto	143
11.2.	Impacto socio-económico	145
A.	Inventario de instrumentos y condiciones de ensayo	150
A.1.	Violas para el estudio del timbre	150
A.2.	Condiciones para el estudio de la influencia de la posición del puente	151
A.3.	Condiciones para el estudio de la influencia de imperfecciones en el apoyo de los pies del puente	151

Índice de figuras

1.	Gli Angeli Musicanti, Gaudenzio Ferrari	7
2.	Ornamentación de un violoncello construido por Andrea Ama- ti para la corte francesa	12
3.	Imagen del cuarteto Palatino realizado por Antonio Stradivari por encargo de la Corte Española	15
4.	Fragmento de “Le Bourgeois Gentilhomme”, de G.B. Lully, con escritura a cinco partes	16
5.	Imagen que muestra diferentes perspectivas de una viola con sus partes localizadas	19
6.	Imagen de un arco moderno con sus partes localizadas	22
7.	Tesitura de la viola en notación musical	25
8.	Circuito análogo propuesto por Schelleng en su artículo [7] . . .	30
9.	Circuito análogo de las resonancias propuesto por Schelleng [7]	34
10.	Gráfica en que Schelleng muestra la combinación de ambos modos propios [7]	35
11.	Primeros seis modos propios de vibración elaborados por Flet- cher y Rossing[12]	41
12.	Curva de admitancia de un violín Guarneri[12]	42
13.	Interferogramas holográficos realizados por Saldner en 1996[15]	44
14.	Primer paso de la simulación [17]	46
15.	Segundo paso de la simulación [17]	47
16.	Tercer paso de la simulación [17]	47
17.	Cuarto paso de la simulación [17]	48
18.	Quinto paso de la simulación [17]	48
19.	Último paso de la simulación [17]	49
20.	Patrón de Lissajous de una cuerda de acero que muestra mo- vimiento de torsión y el conocido como movimiento Helmholtz	55
21.	Simulación de la evolución de las curvas de vibración del cuer- po y de la cuerda, realizado por Raman en el año 1916. [20] . .	59
22.	”Wolftone criterion” representado por Schelleng [5]	61
23.	Representación en notación musical de los parciales superiores partiendo del Do1 (C2) elaborada por Helmholtz [19]	65
24.	Representación de una forma de onda sonora compleja com- puesta por la fundamental y la adición de dos armónicos [26] .	67

25.	Patrón de vibración casi uniforme generado por un violín Guadagnini [19]	69
26.	Fotografía del ensayo propuesto	73
27.	Espectro obtenido en la emisión de DO solamente con el altavoz.	74
28.	Espectros obtenidos en la emisión de DO para las diferentes violas	76
29.	Espectro obtenido en la emisión de SOL solamente con el altavoz	78
30.	Espectros obtenidos en la emisión de SOL para las diferentes violas	79
31.	Espectro obtenido en la emisión de RE solamente con el altavoz	81
32.	Espectros obtenidos en la emisión de RE para las diferentes violas	83
33.	Espectro obtenido en la emisión de LA solamente con el altavoz	86
34.	Espectros obtenidos en la emisión de LA para las diferentes violas	87
35.	Forma actual y más común del puente de la viola [27]	93
36.	Diversas formas que ha ido adquiriendo el puente, y que aún fabrica <i>Milo Stamm Ponticelli Hamburg</i> para violines y violas modernos y barrocos[27]	94
37.	En algunas violas, la línea guía para la colocación del puente se encuentra trazada, como la de la imagen	96
38.	Movimiento rotacional o longitudinal del puente[12]	98
39.	Espectro obtenido en la emisión de DO solamente con el altavoz	102
40.	Espectros obtenidos en la emisión de DO para las diferentes posiciones	103
41.	Espectro obtenido en la emisión de SOL solamente con el altavoz	105
42.	Espectros obtenidos en la emisión de SOL para las diferentes posiciones	106
43.	Espectro obtenido en la emisión de RE solamente con el altavoz	108
44.	Espectros obtenidos en la emisión de RE para las diferentes posiciones	109
45.	Espectro obtenido en la emisión de LA solamente con el altavoz	111
46.	Espectros obtenidos en la emisión de LA para las diferentes posiciones	112
47.	Espectro obtenido en la emisión de DO solamente con el altavoz	117
48.	Espectros obtenidos en la emisión de DO para los diferentes apoyos	118
49.	Espectro obtenido en la emisión de SOL solamente con el altavoz	120

50.	Espectros obtenidos en la emisión de SOL para los diferentes apoyos	121
51.	Espectro obtenido en la emisión de RE solamente con el altavoz	124
52.	Espectros obtenidos en la emisión de RE para los diferentes apoyos	125
53.	Espectro obtenido en la emisión de LA solamente con el altavoz	127
54.	Espectros obtenidos en la emisión de LA para los diferentes apoyos	128
55.	Grupo de violas llevadas a ensayo en la sección 7.3	150
56.	Posiciones del puente para la realización de los ensayos de la sección 8.2	151
57.	Situación de algodones bajo los pies del puente en los distintos casos de ensayo de la sección 8.3	152

Índice de cuadros

1.	Inventario de armónicos de Do para la intercomparación de timbres	77
2.	Inventario de armónicos de Sol para la intercomparación de timbres	80
3.	Inventario de armónicos de Re para la intercomparación de timbres	85
4.	Inventario de armónicos de La para la intercomparación de timbres	89
5.	Inventario de armónicos de Do para el ensayo sobre la posición del puente	104
6.	Inventario de armónicos de Sol para el ensayo sobre la posición del puente	107
7.	Inventario de armónicos de Re para el ensayo sobre la posición del puente	110
8.	Inventario de armónicos de La para el ensayo sobre la posición del puente	113
9.	Inventario de armónicos de Do para el ensayo sobre los pies del puente	119
10.	Inventario de armónicos de Sol para el ensayo sobre los pies del puente	123
11.	Inventario de armónicos de Re para el ensayo sobre los pies del puente	126
12.	Inventario de armónicos de La para el ensayo sobre los pies del puente	129
13.	Cálculo del tiempo empleado para el desarrollo del proyecto .	143
14.	Cálculo del coste de recursos humanos para el desarrollo del proyecto	144
15.	Cálculo del coste del material necesario para la realización del proyecto	144
16.	Cálculo del coste total del proyecto	145

1. Introducción

1.1. Motivación

Más de una vez he entrado al taller de un *luthier*, a una casa dedicada a la venta de instrumentos o algún establecimiento no tan especializado, y me he encontrado con una gama de instrumentos a los que venía asociado un determinado precio. Los motivos por los que algunos tenían un valor mayor era, evidentemente, la calidad del instrumento, basado en algunos criterios como la exquisitez de la madera, el uso de determinados barnices, la antigüedad e historia que llevaba consigo. Algunos de estos parámetros me resultaban evidentes. En cambio, otros me parecían un tanto irrelevantes.

Me hablaban de la brillantez del sonido, de la calidez, rugosidad, tersura, de los bajos intensos o de los agudos elegantes, de su timbre aterciopelado o de su intensidad. Todos estos criterios, completamente subjetivos, me hacían pensar si realmente estaban dando un valor aleatorio o ficticio, si estaban tratando de sacar provecho de mi imposibilidad de objetivar estos parámetros. Yo lo que quería saber es si el instrumento sonaba bien o muy bien, si el sonido que, como músico, iba a ser capaz de producir, iba a tener mayor o menor calidad, si la potencia que iba a poder alcanzar era la que buscaba o me iba a quedar corto. Pero quería datos objetivos con los que yo pudiera elegir de una manera clara y segura. Quería un criterio claro (y objetivo) que me asegurara que el instrumento por el que iba a pagar una suma considerable de dinero merecía la pena, en términos universales, y no basados en meros adjetivos.

En otros instrumentos, como por ejemplo, la guitarra eléctrica o los teclados, basados en cierto modo en componentes electrónicos, es fácil establecer criterios de calidad objetivos. Se puede hablar de tasas de transmisión, de ganancia en dB, niveles de entrada y salida, tipos de conectores mejores o peores, potenciómetros, etc. No es lo mismo utilizar una pastilla u otra, y si pagas más, sabes que estás adquiriendo un componente de mayor calidad. Pero en este tipo de instrumentos no es tan fácil establecer una tasación tan precisa. Y ya no solo hablamos de una cuestión monetaria. No es tan fácil demostrar con criterios objetivos por qué una viola suena mejor que otra en términos numéricos.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo consiste por tanto en estudiar las propiedades acústicas de la viola y entender profundamente cómo se produce el sonido desde un punto de vista físico con el fin de explorar hasta qué punto se pueden extraer características objetivas de calidad.

Para ello, nos proponemos en primer lugar estudiar desde un punto de vista teórico la función de cada elemento, por separado y en conjunto, comprender cómo se relacionan los distintos componentes entre sí, cómo se produce el sonido y cómo es el sonido que se produce, cuáles son los riesgos que pueden comprometer la respuesta del instrumento, los puntos fuertes y los débiles.

En segundo lugar, diseñaremos una serie de ensayos para caracterizar la influencia de algunos de estos elementos seleccionándolos principalmente en base a dos aspectos: la influencia teórica del elemento y la factibilidad del ensayo con los medios de los que disponemos.

Pensamos que estudiando todos ellos podremos quizá aventurarnos a ofrecer puntos clave a la hora de definir qué hace a un instrumento diferenciarse de otro en cuestión de calidad. Somos conscientes de que no sería abarcable en un trabajo de fin de grado, pero si fuéramos capaces de caracterizar precisamente cada uno de los elementos que componen al instrumento, mejorar mediante métodos mecánicos de alta precisión elementos como el puente o la localización óptima del alma para cada instrumento, si lográramos mostrar objetivamente cómo es el timbre de cada instrumento para que cada uno pudiera escucharlo y elegir el que más le agrada, los problemas que tuve al buscar mi instrumento habrían sido muy distintos.

Buscaremos con este trabajo iniciar esta búsqueda, quizá desorbitada, locamente ambiciosa o incluso utópica de caracterizar y determinar las características óptimas que debe buscar un instrumento con sus porqués debidamente justificados, los puntos clave donde la calidad del sonido puede venir comprometida drásticamente y los motivos físicos que podrían llevarnos a identificar problemas o introducir mejoras o modificaciones. Llegaremos tan lejos como podamos.

1.3. Estructura del trabajo

El trabajo está estructurado en un total de once capítulos y un apéndice, que podemos agrupar de la siguiente manera:

1. El trabajo comienza con una breve sección introductoria para comprender la motivación de este proyecto y los objetivos que se persiguen.
2. Estudio del estado del arte (capítulos 2-6). Esta parte la podemos subdividir a su vez en dos grupos:
 - Los dos primeros capítulos de esta sección muestran los elementos que tienen que ver con las características del instrumento en sí. Por un lado, el capítulo 2 consiste en una breve historia del instrumento y los constructores más importantes, para poder comprender por qué ha llegado hasta nosotros la viola tal y como la conocemos. Es importante también comprender algunos acontecimientos fundamentales en la historia de la música que muestran algunos motivos de esta evolución. El capítulo 3 es un primer acercamiento a la viola en sí, sus partes y su tesitura, es decir, el rango frecuencial que es capaz de cubrir, así como sus frecuencias de afinación.
 - Los tres capítulos posteriores hacen referencia a una caracterización empírica del instrumento. El capítulo 4 consiste en una simplificación de todos esos elementos que hemos visto en la sección anterior, utilizando las analogías circuitales propias del mundo de la acústica para establecer modelos de transductores. Partiremos de un estudio realizado por Schelleng para comprender y sintetizar el instrumento como una especie de transductor mecánico-acústico, capaz de traducir movimiento y vibraciones en radiación de presión sonora. Esto nos permitirá hacer una primera traducción de estos elementos a componentes electrónicos que podemos modelar mediante números. Fruto de esta síntesis surge la necesidad de estudiar las características vibratorias que posee el cuerpo del instrumento. Dedicaremos el capítulo 5 a realizar un estudio de los modos propios de vibración, mediante un desarrollo teórico, por un lado, de lo que sucede en la caja armónica, y mediante el análisis de un estudio realizado en la Sociedad Española de Acústica que consiste en una simulación del comportamiento vibratorio de la tapa superior del instrumento antes de ser ensamblado en su conjunto. Esto nos llevará también a determinar y establecer relaciones entre frecuencias de resonancia. El capítulo 6 se hará eco de uno de los problemas propios de este tipo de instrumentos, que es conocido como el tono del lobo, en que

estas frecuencias de resonancia que hemos determinado anteriormente jugarán un papel fundamental. Explicaremos por qué sucede este extraño fenómeno, la susceptibilidad de aparición y algún método para mitigar su efecto.

3. Planteamiento y justificación de la solución adoptada (capítulos 7-8):

Desarrollaremos en el capítulo 7 un discurso en torno al timbre del instrumento, que es la cualidad que permite diferenciar dos sonidos de igual altura e intensidad, pero de diversa procedencia. Mediante una serie de ensayos realizado en una cámara anecóica pasaremos a analizar el timbre de varias violas y trataremos de determinar, mediante el análisis espectral, las diferencias entre estos y la riqueza del sonido en cuanto a dicho criterio.

4. En el capítulo 8 analizaremos en profundidad el puente, pieza fundamental del instrumento, responsable de transmitir la vibración producida en las cuerdas al cuerpo del instrumento. Realizaremos una serie de experimentos para determinar, por un lado, la influencia de alterar la posición teóricamente óptima de este en el timbre, y por otro, la influencia que tiene en el sonido un puente con defectos de construcción. Analizaremos también los riesgos y los puntos candentes en cada uno de los escenarios.
5. Una vez realizado el recorrido a través del estado del arte, y tras plantear y justificar la solución adoptada, dedicaremos el capítulo 9 a reunir las conclusiones clave de este estudio, y posteriormente propondremos algunas posibles líneas futuras de investigación.
6. Haremos en el capítulo 10 un breve desarrollo del marco regulador, realizando un análisis de la normativa específica para laboratorios de ensayo, y en particular, las que tratan de experimentación acústica.
7. Desarrollaremos un presupuesto para la realización del proyecto en el capítulo 11.
8. Añadiremos un apéndice al final del trabajo para ilustrar de manera clara las diferencias de los instrumentos llevados a ensayo, así como los distintos escenarios que hemos propuesto para la experimentación, en la sección A.

2. Breve historia de la viola

Antes de comenzar con un estudio más técnico del instrumento es preciso apuntar brevemente unas líneas que nos permitan comprender cómo y por qué la viola ha llegado a ser lo que hoy conocemos. Del mismo modo que no haremos el estudio técnico de la viola como instrumento en general, y con todas las posibles variantes que a lo largo de la historia han visto la luz (tales como la viola de gamba, de amor, de rueda, de brazo, etc) sino que pondremos el foco en la viola moderna que se utiliza en la mayoría de orquestas, que no es otra que una evolución de la viola de brazo. Mucha de la información a partir de la cual elaboraremos una breve síntesis ha sido extraída del temario oficial utilizado para la oposición a la docencia en conservatorios, con especialidad en viola.[1]

2.1. Tres preguntas como punto de partida

Maurice Riley, en su obra “*Historia de la viola*” [2] apunta que hay tres preguntas que tienen relación con la viola, y que hasta época casi reciente no han tenido respuesta. Estas tres son:

- ¿Cuál es la fecha y el lugar donde tuvo origen la familia del violín?
- ¿Cuáles son los nombres de los violeros que construyeron los primeros instrumentos en forma de violín?
- ¿Qué fue primero, la viola o el violín?

Si exploramos en la literatura que trata la historia de los instrumentos de cuerda, podemos encontrar las investigaciones de autores como Carlo Bonetti¹, Emmanuel Winternitz² o David Boyden³ entre otros, donde encontramos fundamentalmente tres nombres: Gasparó da Saló (Brescia, Italia), Kaspar Duiffoprugcar (Baviera, Alemania) y Andrea Amati (Cremona, Italia).

Winternitz hizo una investigación significativa sobre los posibles orígenes de la familia del violín. Basándose en la pintura italiana de principios del

¹Autor de la importante obra “*A genealogy of the Amati family of violin, 1500-1704*”, Daniel Draley Fine Violins and Cremona Research, 1989.

²Primer conservador del Departamento de Instrumentos Musicales del Metropolitan Museum of Art en Nueva York.

³Musicólogo y violinista especializado en organología e interpretación.

siglo XVI, establece una primera manifestación artística en que aparece un instrumento con la forma de un violín. Gaudenzio Ferrari, considerado un verdadero hombre del Renacimiento (pintor, escultor, arquitecto y músico), realizó un fresco en la *Cupola del Santuario di Santa Maria dei Miracoli* en Saronno, que representa la Asunción de María al cielo, rodeada por una corte de ochenta y siete ángeles, entre los cuales se encuentran muchos cargando con instrumentos musicales de la época, en que se encuentran formas primitivas de violín, viola y violoncello. Junto al fresco de Saronno, son de particular interés las pinturas de una viola tenor en el Museo Borgogna de Vercelli y el fresco de la fachada externa de la *Madonna di Loreto* en Rocapietra. En la siguiente imagen ⁴ podemos apreciar el fresco al que nos estamos refiriendo:



Figura 1: Gli Angeli Musicanti, Gaudenzio Ferrari

Los tipos y las múltiples formas de los instrumentos pintados por Ferrari

⁴Imagen extraída de un artículo para el Centro Cultural Tina Modotti de Caracas, alojada en la siguiente URL: <https://cctm.website/wp-content/uploads/2018/04/gaudenzio-ferrari-768x511.jpg>

hacen pensar que los violeros del norte de Italia, durante el primer cuarto del siglo XVI, hicieron un número considerable de experimentos. Estas pinturas sugieren que la forma del violín se desarrolló antes o durante este período. El último diseño del violín resultó de la búsqueda de los violeros por crear un instrumento que incorporase tres cualidades:

- Potencia acústica mayor que la de cualquier instrumento de arco existente.
- Un modelo estéticamente atractivo.
- Un instrumento que pudiera ser sujetado y tocado con la máxima comodidad.

Por ello, los grandes historiadores apuntan a que probablemente el violín no fue inventado, sino que más bien fue la culminación de una evolución gradual durante la que se fueron utilizando diversas formas hasta que apareció la ideal [3].

Que Kaspar Duiffoprugcar haya sido uno de los primeros constructores de la familia del violín ha sido defendido y discutido por los escritores durante los pasados siglos. No cabe duda que era un artesano de gran talento que producía instrumentos de cuerda de calidad, pero hay tres factores que podrían negar la primacía del maestro artesano en ser el primero o estar entre los primeros constructores, a saber, que no existe ninguna forma o modelo llamado *Duiffoprugcar*, que no tenemos consciencia de que existan a día de hoy violines, violas o violoncellos auténticos hechos por este constructor (así como sí existen modelos auténticos realizados por Amati o Da Saló), y que en el retrato de Kaspar realizado por Woeiriot⁵ se incluyen algunos instrumentos que podrían clasificarse como precursores del violín, aunque ninguno como modelo del instrumento hoy conocido.

La documentación escrita concerniente al primer desarrollo de la familia del violín se limita a pocos tratados que proporcionan una información más bien falta de claridad. Algunos escritores describen instrumentos de tres y cuatro cuerdas sin trastes afinados por quintas, que podrían haber sido violines o prototipos de violines. Jambe de Fer⁶ aporta además descripciones que se pueden aplicar con certeza a violines, dando nombres franceses y las afinaciones de todos los miembros de la familia del violín, a saber:

⁵Eminente grabador, orfebre, pintor, escultor y medallista francés

⁶Compositor del renacimiento francés

- Dessus (soprano): Sol - Re' - La' - Mi"⁷
- Haute-Contre (contralto): Do - Sol - Re' - La'
- Taille (tenor): Do - Sol - Re' - La'
- Bas (bajo): Sib - Fa - Do - Sol

Los nombres de Jambe de Fer equivalen a los nombres para las partes vocales. El soprano lo tocaba el violín, el contralto lo tocaba la viola pequeña, el tenor la viola grande y el bajo el violoncello.

Ahora bien, ¿qué fue antes, la viola o el violín? Generalmente se ha afirmado que la viola ha evolucionado jefe del tronco de la familia del violín, precediendo tanto al violín como el violoncello. Las principales teorías que sostienen esta hipótesis son las siguientes:

1. A causa de su doble *ese* y de su forma, se piensa que la lira de brazo puede ser la antecesora principal de la familia del violín⁸, como demuestra Pretorius⁹ en su *Syntagma musicum*. Afirma: “*La lira pequeña es como la viola de brazo tenor, y se llama lira de brazo. Muchos escritores han supuesto que la viola, dado su tamaño, forma y afinación similares a los de la lira de brazo, fue el primer instrumento en aparecer en el proceso evolutivo*”.
2. La demanda musical a principios del siglo XVI hizo del contralto-tenor el miembro más importante de las distintas familias de instrumentos de cuerda, y por ello la viola debió ser el primer instrumento producido por los violeros cuando se pusieron con la nueva familia.

⁷El uso comillas sirve para especificar la octava en que cada nota se encuentra con respecto de la primera. Las octavas van desde un Do hasta el siguiente Do más agudo, siguiendo la escala natural (Do Re Mi Fa Sol La Si Do'). Esa comilla en el segundo Do simboliza que ambas notas son distintas, tienen una frecuencia proporcional, dado que el segundo Do está al doble de la frecuencia del primero. De esta manera, cuando nos referimos a las tesituras de los distintos instrumentos, partimos de la primera nota sin comillas, y cada nota que lleve esta indicación estará en tantas octavas superiores como signos le acompañen. Sirva a modo de ejemplo este caso, del soprano. Partimos de Sol y avanzamos hacia el Re de esta manera: Sol La Si Do' Re'. Si procedemos de esta manera para el resto de notas, obtendremos la notación aquí usada.

⁸La lira de brazo es un instrumento anterior a la viola, y ya poseía dos aberturas en su cuerpo de manera similar a las *f* de los instrumentos de esta familia, solo que con una forma mucho más sencilla.

⁹Compositor y organista alemán del siglo XVI

3. La palabra *viola* es el término original usado en Italia para la familia entera del violín. Las etimologías de los nombres de la familia del violín se pueden explicar como derivados típicos de la lengua italiana. Así como la palabra italiana genérica *viola* posee la raíz *viol-*, el diminutivo daría origen a la palabra *violino* (viola pequeña) y el aumentativo a la palabra *violone* (viola grande). Además, habría una última palabra que designaría al instrumento situado entre la viola y el violone, introduciendo el infijo *-ello-* que indica más pequeño que, para designar al *violoncello* (añadiendo una *c* por cuestiones de eufonía).
4. Hoy existen más violas del siglo XVI que violines o violoncellos.

Recientes investigaciones parecen rechazar estas controversias, indicando argumentos opuestos en el mismo orden:

1. No todas las liras de brazo tienen doble *ese*, además de que la lira de brazo no era el único antepasado del violín.
2. La premisa de que el contralto-tenor fue el primer miembro de la familia del violín a causa de la demanda musical de principios del siglo XVI ha sido contestada por la exhaustiva investigación de Boyden y Winternitz. Una de las principales funciones de la música de aquella época era la de imitar la extensión de las voces humanas, para acompañar o redoblar las partes vocales como una apoyatura.
3. La hipótesis de que el contralto-tenor sea el miembro más viejo de la familia del violín por su etimología, tiene un sentido lógico pero no ha podido ser probada.
4. El hecho de que existan más violas del siglo XVI que violines o violoncellos podría deberse a varios hechos, a saber, que en los siglos posteriores, las violas se usaban en menor medida, y que por tanto, podrían sobrevivir mejor al desgaste inevitable de instrumentos en uso constante; que muchas de las violas eran en realidad tenores, por lo que era complicado utilizarlas como violas de brazo, etc. En consecuencia, muchas de ellas eran puestas aparte, o mostradas como antigüedades en una época posterior, cuando un violero o restaurador las hubiera reducido a un tamaño más conveniente.

En conclusión, los ejemplos iconográficos y literarios indican que violín, viola y violoncello, con toda probabilidad, se desarrollaron juntos como una

familia de instrumentos, al parecer, a principios del siglo XVI en el norte de Italia, donde Andrea Amati, Gasparó da Saló y otros violeros refinaron los instrumentos hasta llegar a su forma definitiva. Ningún artesano inventó el arquetipo de la familia del violín, sino que se desarrolló con los experimentos de numerosos violeros, que trabajaron con varias formas hasta que se dio el modelo ideal. Los testimonios disponibles pueden sugerir que la viola precedió más o menos al violín; con toda probabilidad, apareció como miembro del nuevo grupo de la familia de los instrumentos de arco, surgiendo a la vez que el violín y el violoncello.

2.2. Grandes constructores

Como hemos hablado en el apartado anterior, tres de los grandes maestros constructores de instrumentos de la familia del violín fueron Andrea Amati, Gasparó da Saló y Kaspar Duiffoprugkar. Pero no fueron los únicos.

Andrea Amati desarrolló su actividad en Cremona, y construyó sus violas en dimensiones pequeñas (contraltos) y grandes (tenores), debido a la demanda de la música instrumental del siglo XVI. Con frecuencia, los instrumentistas se unían a los cantantes y redoblaban las partes vocales. Las violas tenían que tocar la extensión media de contralto y tenor. El hecho más importante que le tocó a Amati vivir fue el encargo de Carlos IX de Francia de construir treinta y ocho instrumentos de la familia del violín para los músicos de la corte. Probablemente, este encargo se hizo bajo la influencia de su madre, la regente Catalina de Médici, que gobernaba en Francia en aquella época, ya que Carlos IX tendría quince años. El encargo especificaba lo siguiente: doce violines de forma pequeña, doce de forma grande, seis tenores y ocho bajos. Estos instrumentos tenían el fondo adornado con pinturas de la insignia real, y pintado a los lados el lema “*Pietate et Iustitia*”. En la siguiente imagen ¹⁰ podemos apreciar un fragmento del conocido como *King Cello*, donde aparece una flor de lis, identificativa de la corte francesa:

¹⁰Imagen propiedad del *Metropolitan Museum of New York* alojada en el siguiente URL: <https://www.metmuseum.org/-/media/images/blogs/musical-instruments/2015/amati-cello-details/2.jpg?as=1&mh=402&mw=600&hash=F6697BAD21385769D57EA11438A6F4F64534C86C>



Figura 2: Ornamentación de un violoncello construido por Andrea Amati para la corte francesa

La reputación de Andrea Amati como constructor de magníficos instrumentos de cuerda la perpetuaron sus hijos, Antonio y Girolamo, que trabajaron en la tienda de su padre hasta su muerte. Algunos instrumentos atribuidos a los últimos años de la vida de Andrea presentan problemas de identificación incluso para los más fiables expertos, pues es difícil, si no imposible, decir con certeza qué instrumentos hizo por completo o parcialmente Andrea, y hasta qué punto estuvieron implicados los dos hijos en el último período de la vida de este hombre.

Brescia, una ciudad a 48 kms al norte de Cremona, gozaba también del prestigio de diversos violeros eminentes que trabajaban allí, entre ellos Gasparo da Saló. Aparentemente, hizo experimentos con varios modelos de viola, mientras continuaba haciendo instrumentos en forma de violín, entre los que estaban el modelo pequeño y el grande. La diferencia de dimensiones es de unos 3 cm para el largo de la tabla armónica, unos 2 cm para el ancho superior y 1 cm para el ancho inferior.

Así como Amati tuvo la oportunidad de realizar grandes encargos, Gas-

paro da Saló realizaba sus instrumentos sobre todo para encargos privados, lo cual podría explicar que sus violas muy raramente tengan las mismas dimensiones. Un factor igualmente probable, que determina las diferentes dimensiones de sus violas podría haber sido la ambición del constructor por mejorar el sonido de los instrumentos, experimentando diversos tamaños. Según los historiadores, Gasparo se preocupaba más de las propiedades acústicas de la madera que de su estética. Poquísimas violas pequeñas han sobrevivido, quizás porque se usaron de manera casi constante desde su salida del taller. Por otra parte, las violas grandes se usaban cada vez menos en el XVII y el XVIII, porque la escritura en cinco partes fue sustituida por la armonización en cuatro partes, con la eventual eliminación de las partes de la viola II y viola III (estilo francés, presente en autores como Lully). Teniendo posibilidad de elegir, muchos ejecutores preferían una viola de medida pequeña.

La fama de las violas de Gasparo y su escasez han producido la existencia de un número siempre en aumento de instrumentos falsos. Pocas de las muchas violas que contienen la etiqueta *da Saló* pueden aceptarse como genuinas. Usualmente, los modelos de Brescia se podían distinguir fácilmente de las de Cremona, pero no siempre era posible identificar al constructor en concreto. Así, si el constructor auténtico era menos conocido que Da Saló, los comerciantes sustituían por un facsímil la etiqueta original. También, violas hechas por sus aprendices, como por ejemplo, Maggini, han sido víctimas de la práctica de etiquetar todos los instrumentos brescianos como *Gasparo da Saló*.

En el siglo XVII, Cremona era sin discusión la capital mundial de manufactura de instrumentos con forma de violín, contando con familias de constructores de la talla de Amati, Bergonzi, Guadagnini, Guarneri, Ruggiero y Stradivari. Otras ciudades italianas tenían sus propias escuelas, que a menudo incluían miembros de las familias de Cremona que habían emigrado. Las más importantes eran Goffriller en Venecia, Tononi en Bolonia o Gagliano en Napoli. Sin embargo, en el mercado hubo una disminución gradual de violas y laúdes, junto con una venta creciente de violines, violoncellos y contrabajos. Las violas eran poco requeridas por dos razones:

1. El progresivo cambio de la armonía de cinco a cuatro partes después de 1600.
2. El surgimiento de la sonata a tres como la forma más popular de música de cámara del siglo XVII, música que generalmente daba relieve a dos violines, con la consecuente exclusión de la viola.

En esta época aparece Andrea Guarneri, aprendiz en el taller de Nicolás Amati hasta que empezara su carrera individual como violero. Su larga asociación con Amati influyó en sus creaciones, muchas de las cuales tienen un modelo similar a los de su maestro. No obstante, había dos diferencias que no hay que infravalorar: su concepción de la viola y el violoncello de medidas más pequeñas, representantes ambos de progresivas innovaciones.

No podemos concluir este apartado sin hablar del legendario constructor Antonio Stradivari. En 1902, los Hill¹¹ escribieron que ellos solamente podían garantizar diez violas hechas por Stradivari. Investigaciones posteriores llegaron a redactar un elenco de hasta dieciocho violas, entre su extensa producción de más de mil cien instrumentos durante su larga carrera productiva, a través de noventa y tres años de vida. Basándose en el inventario de Goodkind de todos los instrumentos Stradivari que han sobrevivido, el porcentaje de violas es de un 2,5 %. Esta cifra, sorprendentemente baja, probablemente está en correspondencia con la demanda decreciente de violas durante la época en que vivió Stradivari. Dos violas encargadas por la Corte de España y construidas en 1696 se conservan aún hoy en el Palacio Real de Madrid. Deborah Rankin, corresponsal económico-financiera del New York Times, afirma que *“las violas Stradivari son totalmente como oro en polvo. Una viola Strad verdaderamente excelente vale mucho más que un violín suyo equivalente”*. En la siguiente imagen¹² podemos apreciar el cuarteto *Palatino* construido por Antonio Stradivari para la Corte Española:

¹¹Hermanos autores de una obra sobre la vida de Antonio Stradivari

¹²Imagen extraída de la cuenta de Twitter del Patrimonio Nacional, alojada en la siguiente URL: <https://pbs.twimg.com/media/CljoYxqWEAA7lxI.jpg>



Figura 3: Imagen del cuarteto Palatino realizado por Antonio Stradivari por encargo de la Corte Española

2.3. El papel de la viola en la música

Por lo que se refiere a su presencia en los repertorios, la viola aparece con un perfil irregular y con el paso del tiempo desplazado e incluso residual. Hemos visto que en el siglo XVI, la viola tenía un papel importante, tanto en su forma mayor, el de la viola de gamba, como en su formato más pequeño, el de la viola de brazo, así como otras variantes. Pero a partir de Monteverdi se toma preferencia por el violín por su registro más agudo, adquiriendo un protagonismo que dejará en segundo lugar de importancia el repertorio para viola. En la práctica se advierte también este desequilibrio entre violín y viola. En su colaboración en un libro con Yehudi Menuhin, eminente y prestigioso violinista, donde aborda ambos instrumentos, William Primrose, considerado por muchos como el mayor violista de todos los tiempos expone con indignación la cultura dominante frente a este instrumento: “*si es un mal*

violinista, que se dedique a la viola”.[4]



Figura 4: Fragmento de “Le Bourgeois Gentilhomme”, de G.B. Lully, con escritura a cinco partes

También hemos visto cómo la escritura a cinco partes (violín I, violín II, viola I, viola II y violoncello) se mantiene a lo largo del siglo XVII, aportando la viola el registro que ocupa la voz de tenor. Y durante este siglo encontramos violas de muy diferentes tamaños, alcanzando los 48 cm de longitud, manteniéndose como tamaño estándar una tapa de 44 cm. Pero es a partir de principios del siglo XVIII donde se reduce la escritura a cuatro partes, desapareciendo la parte de viola II y limitándose su registro cada vez más a papeles de refuerzo armónico. Dos compositores, a su vez violistas, marcan las fronteras entre el siglo XVIII y el Romanticismo: Johann Sebastian Bach y Ludwig van Beethoven. El primero incluye partes para viola en sus cantatas, como hicieran compositores como Telemann, Händel y otros, mientras que Beethoven, que recoge y prolonga el clasicismo, cuenta con la viola para su música de cámara, concretamente para el cuarteto. Esa prolongación supone que las partes de viola en los cuartetos escapaban de su función de mero acompañamiento, lo que había sido una constante en la música de Haydn

y Mozart. El paso siguiente, aunque siempre en proporción numérica muy inferior en relación con el violín, es la presencia de la viola en la forma de concierto, sinfonía concertante y otras formas de música de cámara.

Esta variada pero nada amplia utilización de la viola es la que se mantendrá aun hasta el siglo XX. Se afirmará su independencia en la cuerda dentro de la orquesta ya desde el siglo XIX, al igual que su papel de igualdad en protagonismo en cuartetos u otras formas de cámara. Con estos antecedentes, el repertorio para viola mantiene esa línea de estar dedicado a un instrumento injustamente considerado secundario como voz solista. Es sobre todo Paul Hindemith (no podía ser otro que un violista) quien por su atención a la viola como intérprete, el que cuenta con un catálogo más significativo, en especial en el campo de la música de cámara, donde hay que sumar autores como Debussy, Bloch y Britten. Y hay que destacar en esta época otros conciertos específicos para viola (fuera del caso particular de Hindemith) como son el de Walton y el de Béla Bartók.

Entre los grandes intérpretes de viola se encuentran los ya mencionados Primrose y Hindemith. También están compositores de la talla de J. S. Bach, Beethoven, Paganini o Clarke, así como otros intérpretes legendarios como Lionel Tertis. Actualmente gozan de gran prestigio violistas como Tabea Zimmermann, Yuri Bashmet, Pinchas Zuckerman o Ashan Pillai, entre otros.

3. El instrumento, partes y tesitura

Una vez desarrollado un breve recorrido a través de la historia de este instrumento, pasaremos a analizar someramente cómo ha llegado la viola hasta nuestros días y cómo se ha establecido la forma que hoy conocemos. Haremos un análisis de sus partes, así como del arco, para hacer una primera aproximación y localización de aquellos puntos candentes e importantes donde podremos poner el foco de nuestra investigación. Estos nos darán pistas a la hora de buscar la calidad objetiva del sonido de nuestro instrumento.

3.1. La viola

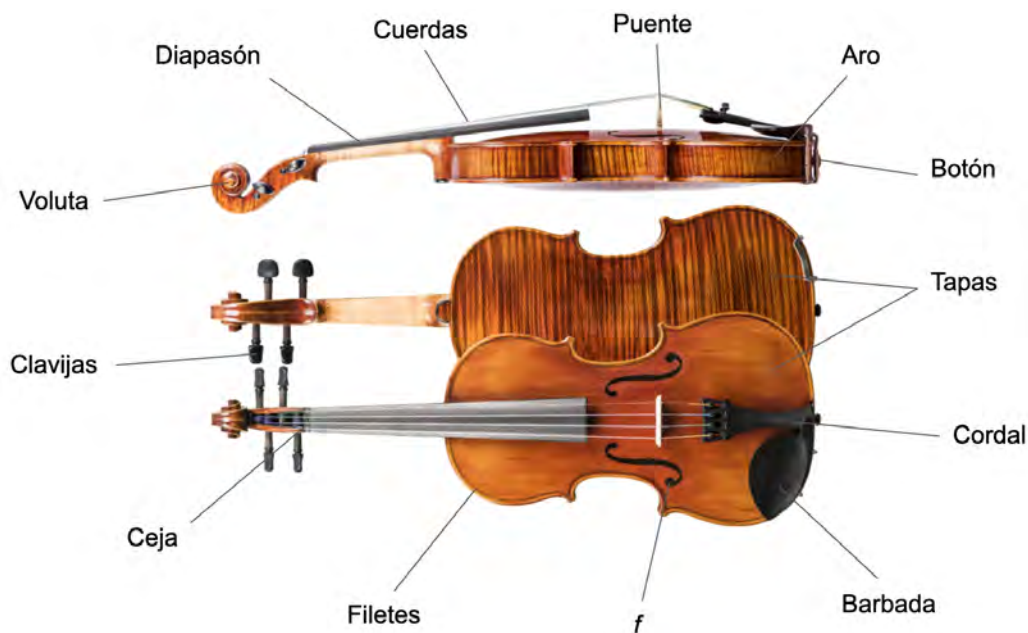


Figura 5: Imagen que muestra diferentes perspectivas de una viola con sus partes localizadas

En primer lugar, tenemos la viola en sí. Podemos localizar diversas partes, entre los que encontramos:

- Clavijas: permiten ajustar la tensión de las diferentes cuerdas para afinarlas en las frecuencias deseadas.

- Ceja y puente: puntos físicos entre los cuales la cuerda vibra. El puente será sobre todo un punto clave, ya que veremos en apartados posteriores que es el elemento que transmite la energía entre los dos cuerpos vibrantes, que serán las cuerdas y la caja de resonancia. Suponen el primer y último nodos de la onda estacionaria que forman las cuerdas al vibrar.
- Diapasón: es el plano (curvo, no horizontal) donde se sitúan los dedos para producir las diferentes notas acortando la longitud de la cuerda. El mango, donde se apoya el diapasón, es la única pieza del instrumento que no se barniza.
- Voluta: tiene función ornamental, pero también sirve de apoyo al músico para realizar la afinación.
- Tapas superior, inferior y aro: forman la caja de resonancia y reciben las vibraciones de las cuerdas transmitidas por el puente.
- Filetes: ornamentos a los bordes de la tapa armónica, pero que también refuerzan la caja evitando que posibles fisuras se propaguen.
- Efes: aperturas en forma de “f” que favorecen la oscilación de la tabla bajo la presión de las cuerdas.
- Cordal: pieza que permite sujetar las cuerdas en la parte inferior de la tabla, con microsensores para ajustar la afinación.
- Barbada: pieza de madera u otro material más confortable que ayuda a sujetar el instrumento y evita el contacto directo de la transpiración con la madera.
- Botón: pieza incrustada a presión que sujeta el cordal. Permite, al retirarlo, comprobar la posición del alma.
- Alma: una de las piezas más importantes, si no la que más. Es un pequeño cilindro de madera situado en el interior del instrumento, que mantiene la presión entre la tabla y el fondo. Transmite las vibraciones a todo el cuerpo del instrumento. Sin esta pieza, el instrumento apenas sonaría, y si no está correctamente ajustada, se produce una pérdida de emisión de alto porcentaje.

- Barra armónica: pieza de madera fina y alargada situada sobre superior la tapa (en el interior del instrumento) que permite reforzar las bajas frecuencias.
- Cuerdas: elemento vibratorio fundamental. Actualmente están fabricadas a partir de materiales metálicos como el acero, acero inoxidable, cobre o incluso plata y oro, aunque tradicionalmente estaban hechas a partir de tripas de cordero estiradas y tensadas.
- Otros accesorios: cabe mencionar algunos elementos externos que se suelen utilizar en la práctica del instrumento, como la almohadilla para el hombro o la sordina.

Si bien es cierto que todos los elementos son importantes para la producción de sonido, los más importantes, y que se someterán al foco de atención de nuestro estudio serán las cuerdas, el puente y las tapas superior (junto con la barra armónica) e inferior conectadas con el alma, que forman la caja de resonancia.

Si el objeto de nuestro estudio fuera el violín aportaríamos además las dimensiones de cada una de las partes, al menos de las fundamentales. En el caso de un violín de tamaño 4/4 (el que usa un músico adulto) diríamos que la tapa superior mide 355 mm de largo, que el ancho en la parte superior es de 165 mm, de 115 mm en el centro del cuerpo y de 205 mm en la parte inferior. Pero como hemos visto en el desarrollo histórico, la viola no ha llegado a tomar un tamaño estándar como el violín. En los primeros siglos se construyeron violas de grandes dimensiones pudiendo rozar incluso los 500 mm de largo de la tapa superior, lo cual se explica por la posibilidad de que fueran violas de brazo o de gamba. La tendencia de utilizar violas grandes, si bien es cierto que acústicamente tiene sentido por la fidelidad a la escala con el violín, suele generar en la práctica pequeñas lesiones y tendinitis, problemas técnicos en la ejecución de ciertos pasajes, etc. Por este motivo no solo se empezaron a construir violas más pequeñas, sino que durante siglos ocurrió que muchos *luthier* tomaban violas de gran tamaño, las desmontaban y acortaban, aprovechando los materiales para construir un nuevo instrumento de menor tamaño. Debe aclararse además que en el caso de la viola, a diferencia de en el caso del violín o el cello, las dimensiones se expresan en pulgadas y no en centímetros.

La viola actual tampoco tiene un tamaño fijo, si bien es cierto que hay una tendencia clara hacia el uso de violas de 15,5", lo que equivale a una

tapa superior de 39,4 cm de largo. Hay diversos motivos a tener en cuenta a la hora de elegir el tamaño de la viola. Un factor fundamental que entra en juego en este apartado es la estatura del músico. Cuanto más grande y alto sea el músico, tenderá al uso de una viola de mayor tamaño, de unos 16" o 16,5", lo que equivaldría a una tapa superior de 40,6 a 42 cm. En cambio, músicos de estatura mediana o pequeña tenderán a medidas del orden de 15,5" o 15", que equivale a una tapa de 38 ó 39,2 cm respectivamente. Otro factor importante es la morfología del músico, puesto que dos músicos de la misma estatura no tienen por qué tener los brazos, hombros o dedos del mismo tamaño. Por ello, una medida habitual que se suele tomar a la hora de elegir la medida del instrumento es la longitud desde el nacimiento del cuello hasta el centro de la palma de la mano izquierda. La flexibilidad del músico también es un rasgo a tener en cuenta. Por último, el criterio del propio músico es un argumento de peso a la hora de elegir la talla adecuada del instrumento. Violas más grandes ofrecen una caja de resonancia mayor, por tanto, la posibilidad de emitir con un volumen mayor, pero esto puede ir en detrimento de la técnica, lo cual no siempre es lo más adecuado.

3.2. El arco



Figura 6: Imagen de un arco moderno con sus partes localizadas

El arco es el elemento a través del cual el músico produce el sonido por medio de la fricción con las cuerdas. Sus elementos son los siguientes:

- Cabeza: encierra una de las extremidades de la mecha, ayudado por la placa (de marfil). Al tocar en esta zona del arco, llamado punta, el arco tiene poco peso y el sonido es suave, pero requiere mayor movimiento con todo el brazo.

- Mecha: crines de caballo frotadas con colofonia (resina) para producir las vibraciones. La tensión se regula con el tornillo. En pasajes más rítmicos se tiende a tensarse más para permitir y facilitar el rebote del arco, mientras que en pasajes más melódicos se tiende a tensarse menos para favorecer la expresividad.
- Vara: permite mantener la tensión de las cerdas. En el arco moderno la forma es convexa, mientras que el arco barroco tiene una forma más cóncava y acabada en punta.
- Entorchado: filamentos metálicos que protegen la vara y equilibran el arco.
- Cuero: recubre la zona de la toma del arco.
- Anillo: extremo donde se mantiene la mecha.
- Talón: parte mecánica del arco que soporta el arco, peso, mecha y tornillo.

En comparación con el arco del violín cabe destacar que el de viola es algo más largo (apenas un centímetro), y tiene un mayor número de cerdas, dado que las cuerdas, al ser de un grosor mayor mayor, requieren mayor contacto con el arco y peso en la técnica para producir el sonido.

3.3. Tesitura

Cuando hablamos de tesitura de un instrumento nos referimos a el rango de notas que un músico es capaz de producir con él. Desde el punto de vista de la ingeniería podríamos hablar en este caso del rango dinámico de frecuencias entre las que se encontraría una onda de sonido generada por él. Por otro lado, es imprescindible en este apartado mencionar que al hablar de la tesitura nos estaremos basando en un sistema de afinación estándar (por intervalos de quintas justas), tomando como referencia la del diapason, afinado a 440 Hz. Esto ha de ser tenido en cuenta puesto que existen diferentes sistemas de afinación (como por ejemplo, el oriental, por cuartas y quintas) y diferentes notas de afinación de referencia (a menudo se afinan los instrumentos tomando como referencia, no 440 Hz sino 442 Hz).

Dicho lo cual, podemos decir que, por un lado, la nota más grave que una viola puede emitir es el Do 2, a una frecuencia de 130,813 Hz, que

corresponde a la cuerda más grave al aire. Las siguientes cuerdas estarán afinadas por intervalos de quinta justa, partiendo de esta frecuencia, de la siguiente manera:

- 4ª Cuerda - Do 2 (C3)¹³: 130,813 Hz
- 3ª Cuerda - Sol 2 (G3): 195,998 Hz
- 2ª Cuerda - Re 3 (D4): 293,665 Hz
- 1ª Cuerda - La 3 (A4): 440,000 Hz

En la primera cuerda se podría llegar hasta una frecuencia de 1318,510 Hz, que corresponde a un Mi 5 (E6), y por medio de la ejecución de armónicos artificiales podría llegarse hasta una frecuencia de 2637,020 Hz. Por tanto, podemos concluir que el rango dinámico en ejecución tiene una amplitud de 1187,697 Hz, o incluso de hasta 2506,207 Hz si contamos la producción de armónicos artificiales.

Ahora bien, ¿cómo se traduce en música esa tesitura? O lo que es lo mismo, ¿cómo se escribe ese rango dinámico en las partituras que usan los violistas? En primer lugar hay que destacar que la escritura de la música para viola se hace en clave de Do en tercera ¹⁴, clave que prácticamente solo se utiliza en el repertorio para este instrumento, junto con la viola de gamba y, en ocasiones, el trombón alto. Supone herencia de la música vocal escrita para contralto (de hecho, en francés se utiliza la palabra alto para referirse a la viola). Las notas más agudas se suelen representar mediante el

¹³Hemos creído oportuno utilizar en todo el trabajo dos notaciones diferentes para referirnos a las notas. Por un lado tenemos el sistema de notación latino. El nombre de las notas proviene en este caso de las primeras sílabas de los versos del Himno a San Juan Bautista escrito por el historiador lombardo Pablo el Diácono en el siglo VIII. Por otro lado tenemos el sistema de notación musical anglosajón, cuya base es alfabética. Parte de el La en notación latina, a lo que corresponde la letra A. Las siguientes notas siguen el orden alfabético hasta llegar al Sol, que es la G, a partir de la cual se vuelve a la A. Los números hacen referencia a las notas de afinación del piano, que parten de A0, equivalente a La -1. Este desajuste es debido a que la nota inicial de la escala en cada una de las nomenclaturas es diferente, y por ello, aunque indiquen la misma frecuencia, el número no coincide.

¹⁴Lo que indica esta clave es que la tercera línea del pentagrama es la nota Do (que en el caso concreto de la viola corresponderá al Do 3 (C4), a la frecuencia de 261,626 Hz, que es en el piano el Do central), a partir de cuya referencia se escriben las demás, dispuestas sobre espacios y líneas.

uso de la clave de Sol para evitar un sinfín de líneas adicionales. La tesitura se escribiría en lenguaje musical de la siguiente manera:



Figura 7: Tesitura de la viola en notación musical

La redonda más grave representa el Do de la cuarta cuerda, el Sol de la tercera cuerda estaría en el primer espacio (sobre la primera línea), el Re de la segunda estaría en el tercer espacio y el La de la primera cuerda se colocaría sobre el espacio superior a la quinta línea del pentagrama.

4. La viola como circuito eléctrico

Hemos hecho un análisis de la historia de la viola, punto de partida fundamental para entender cómo y por qué ha llegado hasta nuestros días el instrumento como lo conocemos hoy en día. Una vez realizado este breve recorrido, hemos pasado a estudiar qué elementos y partes tiene, y qué función tiene cada una de ellas, al menos someramente. El siguiente paso consistirá en establecer un modelo matemático para entender el instrumento a través de analogías eléctricas, de modo que podamos identificar y entender el funcionamiento, cómo los elementos interactúan y se relacionan entre sí, utilizando conceptos eléctricos. Para ello, nos basaremos en un estudio realizado por John C. Schelleng, titulado “*The violin as a circuit*” [5]. Los diferentes parámetros que se definen, así como los cálculos, se basarán en diagramas circuitales simples para la resonancia principal del cuerpo y la resonancia del aire, mientras que las curvas que veamos describirán el desempeño de estos.

Así como el uso de analogías circuitales es una práctica extendida en el campo de la acústica, ha sido difícil de aprovechar en el caso de los instrumentos de arco, y mucho menos en el nivel de detalle que se realiza, como por ejemplo, en el caso de los transductores electroacústicos. La familia del violín presenta muchos problemas sin resolver, y por ello, algunos de los resultados que se ven en el estudio no pretenden ser cuantitativamente precisos, pero sí muy esclarecedores conceptualmente. El estudio de Schelleng se centra, eso sí, en el violín, pero nosotros entenderemos la viola como un instrumento de características, forma y elementos muy similares, pero con un factor de escala. Esto nos conduce inevitablemente a la apreciación de que el modelo casi perfecto que supone el violín como instrumento (desde el punto de vista acústico) lo es en las dimensiones concretas del violín. Los demás instrumentos de la familia se han hecho a escala del violín, pero no de manera uniforme (la escala no es 1:1 sino 2:3 aproximadamente). Es decir, si la viola hubiera sido construida a escala perfecta del violín para las frecuencias que radia la viola, la práctica habría sido imposible, pues habría requerido que las cuerdas y la caja fueran mucho mayores, el instrumento habría sido excesivamente pesado y los dedos del músico habrían tenido que tomar unas dimensiones fuera de lo humano. Lo mismo sucede con el resto de instrumentos de su familia. Esto acarreará ciertos problemas inevitables que analizaremos más adelante.

El sistema acústico de estos instrumentos consta de varios elementos distintos e interconectados que trabajan de forma cooperativa para generar el

sonido del instrumento: el excitador del sonido, que consiste en el trabajo cooperativo de las cuerdas y el arco; el resonador, que lo constituye el cuerpo con sus resonancias naturales responsables de la calidad del tono y de la radiación del sonido; el puente, que transfiere la energía mecánica de las cuerdas al cuerpo, conectando ambos sistemas oscilantes. Además, la barra armónica distribuye la energía a la tapa superior y al alma, responsable de transmitir esa energía a la tapa inferior y soportar las fuerzas que ejerce el puente.

En contraste con muchos de los sistemas de radiación de banda ancha, como microondas o sistemas Hi-Fi, los constructores de violín del siglo XVII desarrollaron la radiación de sus instrumentos distribuyendo a través del ancho rango de frecuencias, muchas frecuencias relativas estrechas, en lugar de usar una o dos bandas de respuesta cercana. En las octavas mayores, la madera provee de resonancias en el cuerpo en número suficiente como para lograr una respuesta más o menos uniforme. En las octavas más bajas, la resonancia más baja se conoce comúnmente como resonancia principal del cuerpo. Sin refuerzo por debajo de este punto, la respuesta cae en un ratio de 12 dB por octava, o incluso más. La resonancia del aire contenido en la caja armónica del instrumento se emplea, al igual que en los sistemas de altavoces, para sostener el volumen que se radia al exterior, en este caso, a través de los huecos en forma de f . Incluso un violín de alta calidad tiene regiones fuertes y débiles en su rango de frecuencias, pero el efecto no es tan extremo como la propia definición sugiere. F. A. Saunders¹⁵ señaló que la sensación subjetiva de uniformidad que evoca un buen instrumento, depende del efecto en el cual el oído reconoce la nota fundamental con un incremento de volumen, causado en realidad por armónicos que refuerzan el sonido [6].

4.1. Circuito equivalente

En la siguiente figura se aprecia el circuito mediante elementos eléctricos según las analogías estándar utilizados en acústica para la representación de sus circuitos, a saber, las analogías impedancia y movilidad. Sin entrar en gran detalle, estas analogías establecen relaciones entre los tres “mundos” en los que vive, por ejemplo un micrófono o transductor electroacústico capaz de transformar ondas de presión en señales eléctricas. Estos “mundos” son el eléctrico, el mecánico y el acústico, y trabajan con las mismas ecuaciones

¹⁵Profesor emérito de la Universidad de Harvard

diferenciales. Por ejemplo, si tenemos una cierta masa mecánica podemos decir que:

$$f(t) = m * a(t) = m * \frac{du(t)}{dt} \quad (1)$$

La segunda ley de Newton nos permite calcular la fuerza $f(t)$ que posee una masa m sometida a una determinada aceleración $a(t)$, que es función del tiempo. La aceleración, además, puede sustituirse como la derivada de la velocidad con respecto del tiempo. Si nos fijamos ahora en la ecuación que define la tensión que cae en una bobina:

$$E(t) = L * \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

La tensión $E(t)$ que cae en una bobina puede obtenerse como el producto de la inductancia de la bobina L (que viene definida como la relación entre el flujo magnético, la intensidad de corriente eléctrica que circula por ella y el número de vueltas del devanado) por la derivada de la intensidad de corriente $i(t)$ que circula por ella con respecto del tiempo.

Ambas fórmulas son iguales¹⁶ luego puedo construir un circuito que represente la bobina pero que, en cambio, se refiera a la fuerza. De igual manera, podemos establecer analogías entre las ecuaciones que relacionan caudal, velocidad volumétrica y superficie con ecuaciones diferenciales de la mecánica.

De esta manera, y siguiendo estas analogías, somos capaces de representar lo que sucede en los tres casos por separado. Haciendo uso de la teoría de transformadores podemos relacionar estos mundos separados entre ellos, desarrollando de manera analógica la transducción, es decir, la transformación de una realidad eléctrica en una mecánica (una señal eléctrica produce movimiento, por ejemplo, en una bobina que entra y sale de una cavidad, que hace que un diafragma se mueva, etc), y esta provoca un efecto acústico

¹⁶Cuando decimos que son iguales, no lo afirmamos, obviamente, en sentido estricto. Nos referimos al hecho de que poseen la misma estructura. Las dos expresiones son el producto de una constante por la derivada de una variable con respecto del tiempo. En el primer caso, la constante es la masa y la variable es la velocidad; en el segundo caso la constante es la inductancia de la bobina y la variable es la intensidad de corriente que la recorre. Ambas expresiones son análogas.

(ese movimiento del diafragma hace que se produzcan cambios en la presión acústica y se radie energía en forma de sonido al exterior). Todo ese proceso lo podemos representar mediante elementos, todos ellos eléctricos. Utilizando la teoría de circuitos que conocemos, podemos analizar más profundamente lo que ocurre. Veamos, por tanto, el circuito esquemático propuesto por Schelleng para el caso del violín:

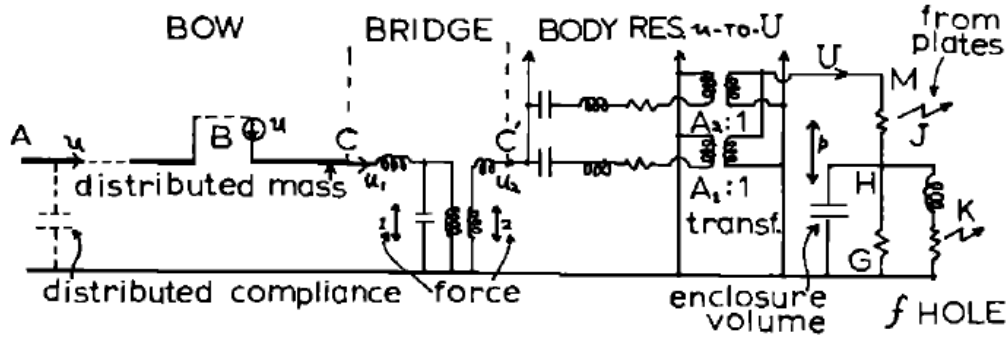


Figura 8: Circuito análogo propuesto por Schelleng en su artículo [7]

El circuito comienza en el punto B, ahí donde el arco produce la fricción en la cuerda y ocurre el efecto *stick-slip*. Usando un microscopio de vibración, Herman von Helmholtz ¹⁷ fue el primero en utilizar el denominado efecto *Lissajous* para estudiar los patrones de una cuerda de violín frotada. Con este método pudo determinar el movimiento de empuje y retorno de la cuerda (*stick-slip*) conocido como *movimiento Helmholtz*, y deducir una forma de onda en dientes de sierra. En este movimiento, la cuerda describe una curva en el punto de intersección, y esta se propaga a lo largo de la cuerda haciendo un recorrido de ida y vuelta en cada período de vibración. La envolvente que describe la cuerda y se propaga a lo largo de ella se compone de dos parábolas de amplitud máxima proporcionales a la velocidad del arco, siempre dentro de unos límites.

Identificó también algunos parciales en los tonos de los violines utilizando resonadores esféricos de varios tamaños (*resonadores Helmholtz*), de ahí que la resonancia del aire incluido en el cuerpo se denomine *resonancia Helmholtz*.

¹⁷Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz fue un médico y físico alemán, que realizó contribuciones significativas en numerosas áreas de la ciencia moderna, entre ellas, la acústica y psicoacústica

La variación friccional entre la cuerda y el arco mantiene las oscilaciones de la cuerda que suministran la energía al cuerpo resonador en una frecuencia particular, determinada por la longitud de la cuerda, que a su vez depende de la digitación aplicada por el músico. Un ciclo del movimiento *stick-slip* se sincroniza con el modo fundamental de la cuerda. Una proporción de esta energía en forma de onda mecánica se drena por el puente al cuerpo, mientras que el resto es reflejada. Estas proporciones vienen determinadas por la impedancia acústica del puente, que veremos más adelante. Las ondas reflejadas son interferidas por nuevas ondas inyectadas por el músico, lo que da lugar a un patrón de vibración definido como onda estacionaria o modo de vibración, el cual almacena la energía en la cuerda. Este patrón está caracterizado por presentar zonas de máxima vibración y zonas de cero vibración en función de la fase con la cual se han interferido.

Desde el punto de vista circuital, el contacto que se produce en B entre el arco y la cuerda se puede modelar como un generador de velocidad constante, lo que supone un suministro de energía en oscilaciones transversales. Es inherente en el concepto de Helmholtz que empuje y retorno están sincronizados por la fricción discontinua, que dispara un pulso que se regenera constantemente. Uno podría esperar que ocurriera existiera una frecuencia para la que la reactancia vista por el arco en la fundamental fuera cero. Si esto ocurriera, la frecuencia cercana a la resonancia principal saldría intolerablemente de la frecuencia natural de la cuerda. Gracias a los armónicos, cuyas impedancias son independientes de la resonancia principal, este efecto es pequeño.

El movimiento de contacto se sitúa en serie con las dos partes en que se divide la cuerda. Excepto para los armónicos de frecuencia alta, la sección AB es esencialmente reactancia mecánica positiva, y la sección BC exceptuando si es modificada por la impedancia del puente, es negativa. Juntas forman un circuito resonante en serie. Para nuestro propósito, la cuerda se tomará como una línea de transmisión sin pérdidas.

El puente situado en C es el transductor que recibe potencia de la cuerda y la transmite al cuerpo, y en consecuencia, se excita el aire que lo rodea. Como veíamos al principio, es el responsable de transformar un proceso mecánico en una realidad acústica. Así como el movimiento del puente se lleva a cabo en su plano (no horizontal, sino curvo), debe destacarse que, al ser un cuerpo rígido (que experimenta movimientos, como por ejemplo, de torsión), actúa en las octavas más bajas como un transformador. Su compliancia (que es lo contrario a rigidez, es decir, elasticidad) es importante para la transmisión normal de frecuencias más altas.

El alma es una parte fundamental del cuerpo. Vimos en apartados anteriores que es un pequeño cilindro rígido de madera que conecta las dos tapas del instrumento y transmite las vibraciones a todo el cuerpo. Comparte con las guarniciones¹⁸ la función de conectar la fuente de vibración, y es extremadamente importante como un medio para proporcionar la asimetría necesaria para una radiación efectiva. Además juega un papel importante a la hora de determinar la frecuencia fundamental y la forma geométrica de los modos propios de vibración de la caja armónica. El uso de una caja cerrada con paredes vibrantes es un dispositivo ancestral en el campo de la construcción de instrumentos. Aun cuando las hendiduras en forma de f de la viola se hicieran sumamente estrechas hasta el punto de que no fueran emisores de sonido, el recinto cerrado que supone la caja armónica seguiría siendo esencial puesto que son las variaciones de volumen que se producen en ella las que le dan el carácter de fuente simple, y estos cambios de volumen interfieren entre partes de su superficie que se encuentran en oposición de fase.

El puente se apoya con uno de sus pies cerca de la zona del alma, y el otro sobre la barra armónica¹⁹. Sin pérdidas y sin radiación, el puente vería la tapa superior con sus muchos modos de vibración como un complicado circuito reactivo. Pérdidas en el material y pérdidas por radiación modifican la curva de reactancia y añaden una curva de resistencia finita. Para cada frecuencia, la respuesta dinámica del cuerpo ante la fuerza drenada por el puente consiste en la suma de las respuestas de los diferentes modos. La baja resistencia de un modo resonante tiende a “cortocircuitar” las otras. El cuerpo actúa pues como un número de circuitos resonantes serie en paralelo, pero incluso la resistencia resonante debe ser proporcional a la impedancia característica de la cuerda. De esto no se sigue la conclusión, sin embargo, de que los picos acústicos se asocien a puntos en los que las impedancias son las más bajas, salvo alguna excepción.

¹⁸En el tercer capítulo lo estudiamos como filetes, pequeños ornamentos a los bordes de la tapa armónica que sirven también de refuerzo de la caja.

¹⁹En el capítulo octavo dedicado específicamente al puente veremos que esta posición no es casualidad. El pie situado cerca del alma sirve de refuerzo en alta frecuencia, mientras que el otro pie sirve de refuerzo en baja frecuencia.

4.2. Las resonancias del cuerpo y el aire contenido en la caja

H. Meinel²⁰ logró trazar las líneas nodales que aparecen en las tapas superior e inferior de un violín de calidad para determinar siete modos de vibración, los cuales estudiaremos en apartados posteriores[8]. En las octavas más bajas, el alma, situada cerca del pie derecho del puente produce un efecto moderador, al impedir en cierto modo el movimiento, ya que es un cilindro rígido de madera que soporta grandes tensiones e impide que se hunda la tapa. Esto conduce inevitablemente a un mayor movimiento en el pie izquierdo del puente que en el derecho. Meinel llegó incluso a estimar que el movimiento en la cuerda es mayor en el pie derecho del puente con un factor de aproximadamente 1,5. El puente, la barra armónica y la tapa superior oscilarán entonces alrededor de un punto nodal cerca del alma. Los *luthier* han localizado comúnmente la resonancia fundamental del cuerpo del violín unos quince semitonos por debajo del tono más bajo posible. En el caso de la viola y el violoncello, unos diecisiete semitonos. Si hacemos los cálculos, partimos del Do2 (C3): 130,813 Hz, y diecisiete semitonos por debajo llegamos al Sol0 (G1): 48,9995 Hz, pero como ya hemos mencionado y veremos en capítulos posteriores, la mala escalabilidad de la viola y la posibilidad de que el instrumento tenga diferentes tamaños hacen que esta referencia no siempre sea correcta, y esa frecuencia de resonancia pueda estar desplazada.

El movimiento de las tapas ocasiona cambios también en el aire contenido en la caja de resonancia. Si la frecuencia es muy baja, el aire pasa a través de las f sin que ocurra un cambio de presión; en cambio, si la frecuencia es alta, el aire es atrapado dentro de la cavidad y se comprime. Esta cavidad, junto con sus orificios de entrada y salida sería, según Schelleng, un circuito en paralelo, y guarda similitud con sistemas de tipo *bass reflex*²¹, siguiendo el siguiente esquema simplificado:

²⁰ Autor alemán de importantes artículos para la *Akustische Zeitschrift*.

²¹ Sistemas basados en el uso del sonido generado en la parte trasera del diafragma de un altavoz para ayudar a acentuar las frecuencias más bajas del sonido.

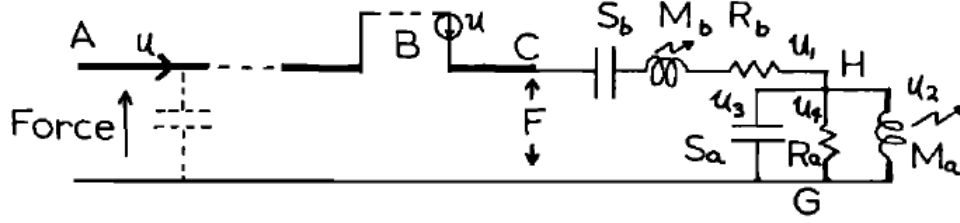


Figura 9: Circuito análogo de las resonancias propuesto por Schelleng [7]

Saunders hizo experimentos también acerca de las pérdidas en la radiación del instrumento debido a los modos propios del aire contenido en la caja armónica causado por numerosos motivos tales como la radiación eficaz, la absorción de los materiales, la viscosidad del aire, etc[6]. Para que un modo propio sea efectivo tiene que satisfacer dos requerimientos:

- Debe ser energéticamente excitado por las paredes que lo contienen, y debe tener impedancias parecidas a las f .
- Su existencia depende del flujo de aire a través de las f .

Todos estos elementos son los responsables de la forma final en que se produce la radiación, y tendrán influencia concreta en la potencia de radiación, la composición de los armónicos que dan lugar al timbre del instrumento, etc.

4.3. Combinación de ambos modos propios

Que Schelleng haya hecho un estudio tan concreto sobre los modos propios del cuerpo y del aire contenido en él no es casualidad. No son medidas aisladas, sino que en los mejores instrumentos, estos modos están altamente relacionados para conseguir un mejor efecto total y asegurar un fuerte registro en bajas frecuencias. Han de ser considerados a la vez, lo cual no es algo sencillo. La combinación de ambos modos y sus relativas frecuencias de resonancia dan lugar a la siguiente gráfica:

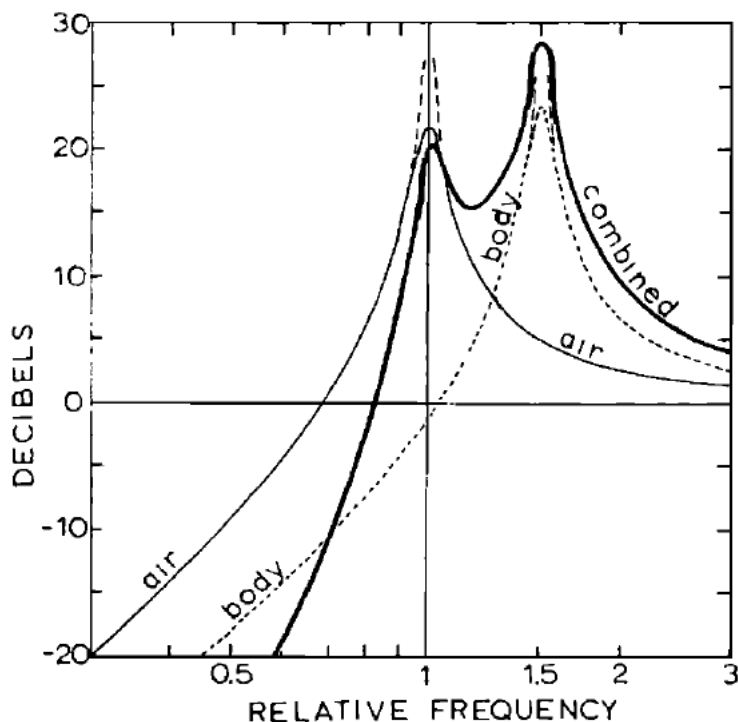


Figura 10: Gráfica en que Schelleng muestra la combinación de ambos modos propios [7]

La curva trazada mediante una línea de puntos representa la radiación estimada, sin contar con la radiación del aire, utilizando un volumen realmente alto o tapando las f . Si la resonancia del aire se permite ahora, y se ajusta a un intervalo de quinta justa por debajo de la resonancia del cuerpo, tendríamos la curva trazada con línea delgada, que supone un incremento de la radiación en decibelios. Finalmente, la combinación de ambas daría lugar a la curva en negrita. Podemos observar un pico muy pronunciado en la resonancia del cuerpo, mientras que también notamos un decremento notable en bajas frecuencias. En el caso de la viola, la resonancia del aire se ha situado generalmente once semitonos por debajo de la resonancia fundamental más baja, lo que supone una desventaja en este sentido de 8 dB. Según Schelleng, la curva es incluso demasiado optimista en alta frecuencia por la gran simplificación del circuito, pero no parece descabellado afirmar que hay cierta

ganancia una octava por encima, y un incremento de unos 9 dB o más media octava por encima.

La curva de resonancia del cuerpo, lejos de caer a valores muy bajos en altas frecuencias, se acerca cada vez más a la asíntota horizontal. Tal comportamiento, que se mantiene a través de todos los modos más allá de la frecuencia fundamental de resonancia, haciéndose junto a su masa equivalente independientes de la frecuencia. La manera en que los diferentes modos se combinan depende también de las relaciones de fase. La importancia de las resonancias no es tanto la de aportar grandes picos muy pronunciados, sino pequeñas y anchas colinas.

4.4. Conclusiones

El recorrido que hemos hecho a lo largo del circuito propuesto nos hace centrarnos en algunos puntos esenciales donde pondremos el foco de nuestras investigaciones hasta el final del trabajo. Destacan los modos propios de vibración que tienen lugar tanto en el cuerpo del instrumento como en el aire contenido en la caja. Esto nos permitirá conocer la estructura vibratoria de la viola, nos permitirá también localizar las frecuencias fundamentales de vibración y, muy importante, si estas son adecuadas para la música que se va a interpretar con ella. Es importante también porque eso va a suponer, en definitiva, la radiación que se produzca a través de las hendiduras en forma de f a través de las cuales el sonido viene afuera.

El puente es un elemento fundamental, pues actúa como transductor mecánico-acústico entre el movimiento y la vibración que se produce en las cuerdas por el efecto del arco y con la influencia de la digitación utilizada por el músico, elementos mecánicos que se traducen en vibraciones que se drenan por el puente al cuerpo, produciendo las vibraciones y la radiación de ondas de presión sonora. En el caso del micrófono o el altavoz existen elementos esenciales responsables de la transducción, como por ejemplo el diafragma, que si están contruidos de manera defectuosa, o si está situado incorrectamente, ya sea por motivos de la construcción original o por desplazamiento debido a un golpe o un uso inadecuado, no realizan la transducción correctamente. De la misma manera, si el puente no está correctamente construido, situado, la transducción se verá afectada, y la emisión del sonido vendrá penalizada. En el apartado específico dedicado al puente realizaremos una serie de ensayos mediante los que estas consecuencias podrán ser observadas claramente.

La forma concreta de la señal generada por el instrumento y que es radiada al exterior determina el timbre del instrumento. Esta viene determinada por la situación y localización de los armónicos, la potencia relativa entre ellos y su persistencia en el tiempo en el interior de la caja armónica (o, dicho de otra manera, el tiempo que tardan en caer un determinado nivel). En el apartado dedicado al timbre del instrumento someteremos a ensayo a una serie de instrumentos de diverso tamaño y calidad. Para ello nos valdremos de la teoría de vibración por simpatía. Mediante la emisión de tonos puros sintonizados con las frecuencias a las que están afinadas las distintas cuerdas produciremos su vibración haciendo sonar al instrumento sin tocarlo, sin estar ligado a la acción irregular de un músico en que la emisión no sería controlada de manera precisa. Pondremos un micrófono muy cerca de las f para capturar todos los armónicos que se generan en el interior del instrumento por acción de la vibración de cada cuerda en cuestión, como si un músico la estuviera excitando. Compararemos los espectros que muestran los diferentes armónicos, trazaremos gráficas que muestran cuánto tiempo tarda el sonido en caer y otras pruebas mediante las que trataremos de establecer algún criterio de calidad comparando violas distintas.

Por último, y así lo desarrolla brevemente Schelleng en su estudio, estudiaremos el fenómeno del tono del lobo, que puede ser utilizado como un indicador relativo de resonancia. Este curioso efecto, que con rareza ocurre en el violín, aparece en instrumentos de mayor tamaño de su familia, como la viola y, en mayor medida, en el cello, debido sobre todo a la escala imperfecta de estos. Dedicaremos un apartado concreto a este efecto, estudiaremos sus causas y la susceptibilidad de que este pueda aparecer o no en la viola. En nuestro caso, someteremos todas las violas de ensayo a pruebas para tratar de localizar el tono del lobo y determinar si lo poseen o no. Veremos también alguna manera de combatirlo o, al menos, de tratar de controlar y mitigar su efecto.

5. Estudio de los modos propios

Hemos visto que el comportamiento acústico de la viola depende en baja frecuencia fundamentalmente de dos factores: el comportamiento vibratorio de las tapas que conforman la caja armónica y el aire contenido en dicha cavidad. Este comportamiento vibratorio es probablemente el factor más determinante en cuanto a lo que a calidad se refiere. Aunque el estudio vibratorio de las tapas de los instrumentos de la familia del violín ha sido realizado a lo largo de más de 150 años, nuestro conocimiento profundo de estos nos ha llegado de la mano de tecnología como la interferometría holográfica, permitiendo construir modelos y extraer conclusiones mucho más precisas²².

El concepto de resonancia es entendido como la respuesta reforzada de un sistema a una fuerza motriz en una frecuencia que coincide o se sitúa muy próxima a su frecuencia natural. La condición indispensable para que se produzca la resonancia es, por tanto, que interactúen dos elementos que vibren en la misma frecuencia, o al menos, muy próxima; estos elementos son las cuerdas y el cuerpo[10]. En el caso de los instrumentos de arco, el sistema acústico se compone de estos dos elementos oscilantes o resonantes, junto con el puente, que podría considerarse también como un resonador con su rango de frecuencias resonantes. Cada resonador produce una o varias frecuencias de resonancia, posee un factor de amortiguamiento, una forma concreta o patrón y un valor de radiación efectiva. Las cuerdas disponen de un conjunto de modos propios de resonancia. El cuerpo de un instrumento de arco también produce varios modos de vibración, junto con sus propias frecuencias de resonancia o armónicos, ya que además de la frecuencia principal de resonancia del volumen de aire contenido en él, la tapa superior e inferior poseen también un conjunto de resonancias con sus respectivos armónicos o frecuencias, además de la frecuencia de resonancia principal en la que el cuerpo vibra como un todo.

Los modos propios de vibración (también conocidos en la literatura relativa a este tema como *eigenmodes*) vienen entonces determinados principalmente por el movimiento del conjunto formado por las tapas superior e

²²En 1948, el físico de origen húngaro Dennis Gabor, considerado el padre de la holografía, realizó el primer holograma con luz proveniente de una lámpara de mercurio con un filtro para la luz verde. Los principios físicos de la holografía están basados en la naturaleza ondulatoria de la luz y son la interferencia (en la etapa de registro) y la difracción (en la etapa de reconstrucción) [9].

inferior y el aire contenido entre ellas. También influyen aunque de manera más residual otros elementos tales como las guarniciones, el mástil, etc. El caso de la viola es mucho más complicado de modelar que caso de una guitarra, principalmente por efecto del alma. Aunque muchos de los modos de vibración han sido modelados de manera satisfactoria por el método de elementos finitos (Rodgers, Rubin y Farrar, Richardson realizaron modelos ya en 1986), gran parte del conocimiento de los *eigenmodes* que tenemos se basa en estudios experimentales.

La viola, en común con cualquier otra estructura que da lugar a vibraciones de pequeña amplitud, puede ser entonces caracterizada por un conjunto de modos propios de vibración, cada uno de los cuales con su frecuencia de resonancia. Según Jim Woodhouse²³, si se posee toda la información referente a cada uno de los modos propios de vibración, entonces el comportamiento del instrumento queda completamente descrito[11]. Vicente Pastor añade además que la calidad del tono de un instrumento de arco está determinada por sus modos de vibración[10]. Que por esta razón, cuantos más armónicos estén presentes en la vibración y más armónicamente se hallen, más calidad tendrá el sonido producido. En el rango audible de frecuencias, que se sitúa entre 20 y 20.000 Hz, la viola tiene cientos de modos vibratorios. De alguna manera, el objetivo del constructor consiste en controlar los parámetros de dichos modos para lograr producir el comportamiento vibratorio deseado, si bien es cierto que un *luthier* tampoco puede esperar ser capaz de manipular más que una pequeña fracción de tales parámetros de manera explícita. Cualquier cambio estructural puede afectar a los parámetros de los modos propios. Por ejemplo, un cambio en la forma puede alterar la radiación eficaz, y puede quizá afectar más significativamente a la amplitud en una zona cercana al puente y en consecuencia, la eficiencia de la excitación drenada al cuerpo por efecto de la cuerda. Veamos brevemente cómo se manifiestan estos modos siguiendo el estudio realizado Fletcher y Rossing en su obra “*The Physics of Musical Instruments*”[12].

El primer modo del cuerpo que aparece (C1 siguiendo la nomenclatura empleada por Erik Jansson²⁴) es similar al primer modo de una barra, con una línea nodal cerca del puente y una cerca de la ceja. Este modo no radia

²³Matemático y profesor de la Universidad de Cambridge, autor de numerosas publicaciones relacionadas con la acústica del violín, la vibración en estructuras complejas, así como la inducida por fricción y su respuesta en frecuencia.

²⁴Profesor del en el KTH Royal Institute of Technology de Estocolmo, Suecia, autor de numerosas publicaciones acerca de las resonancias del violín.

sonido de manera eficiente, pero probablemente contribuye a que el músico pueda sentir el propio instrumento, y no solamente eso, este modo se acopla también a otros modos que sí radian sonido, por el hecho de tener frecuencias de resonancia similares. El modo más bajo que tiene importancia desde el punto de vista acústico es el de la resonancia fundamental del aire, llamado A_0 , en el cual aparece una gran cantidad de movimiento hacia dentro y hacia afuera de las f . En ocasiones es conocida como la resonancia del aire Helmholtz, término que puede llevar a confusión dado que la resonancia del aire Helmholtz suele describir el movimiento resonante del aire dentro y fuera de una cavidad con paredes rígidas. En el caso de un violín o una viola corresponde generalmente con un mínimo de admitancia justo por encima de la resonancia del orificio en forma de f cuando se aplica una fuerza sobre la tapa superior o el puente.

Podemos mostrar los patrones que tienen lugar en los primeros cuatro modos propios del cuerpo (C_1 , C_2 , C_3 y C_4), junto con el modo A_0 y T_1 (el primer modo de la tapa superior).

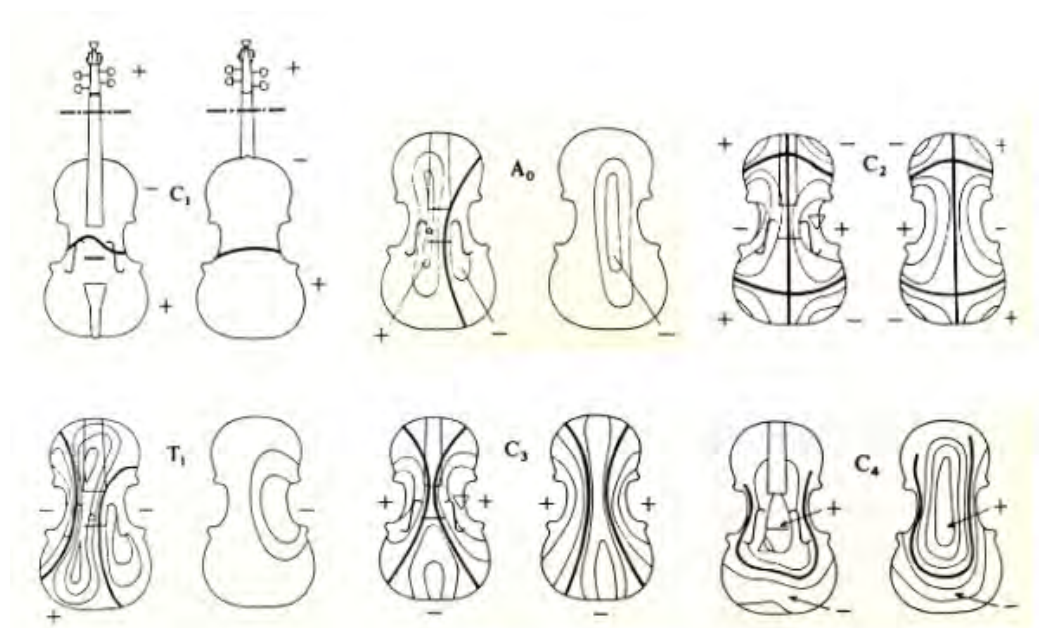


Figura 11: Primeros seis modos propios de vibración elaborados por Fletcher y Rossing[12]

Las resonancias o modos del cuerpo controlan las bajas frecuencias junto

con la resonancia principal del aire, mientras que los modos de la tapa y el fondo cubren las medias y altas frecuencias. Por último, la resonancia del puente potencia las frecuencias más agudas. Los modos designados como A0, T1, C3 y C4 aparecen como los más importantes modos en baja frecuencia de un violín. Se identifican claramente en la curva de admitancia de un violín Guarneri mostrada a continuación:

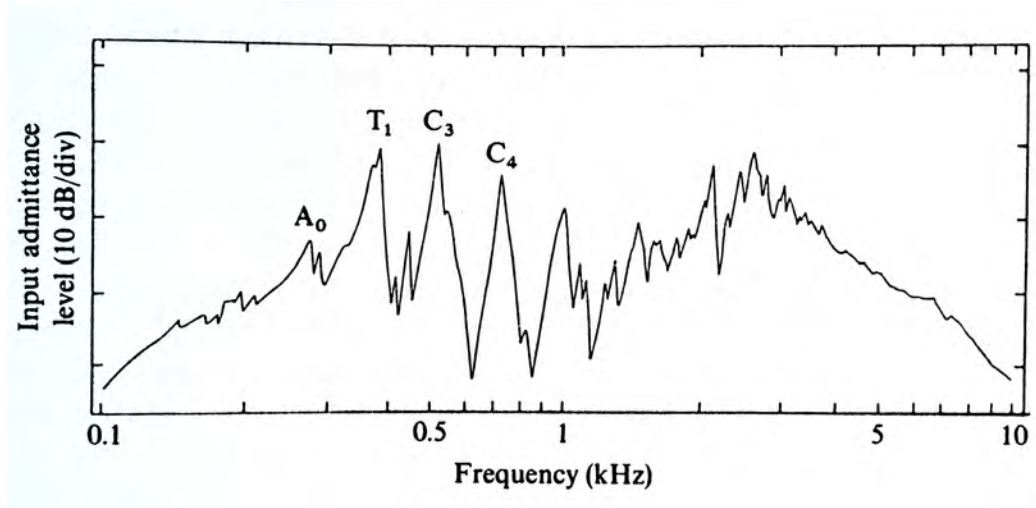


Figura 12: Curva de admitancia de un violín Guarneri[12]

Una serie de cálculos sencillos realizados por Alonso Moral y J. and Jansson, del KTH muestran que los niveles de resonancias A0, T1 y C4 están correlacionados con la calidad del tono.[13] También entran en juego aquí propiedades alrededor de la frecuencia de resonancia fundamental del puente. En baja frecuencia, más allá de C4, el pie del puente apoyado sobre la barra armónica es más eficiente al drenar las vibraciones, mientras que, en frecuencias mayores, ambos pies tienen un nivel de eficiencia muy similar. La energía mecánica transferida por el puente se drena al cuerpo del instrumento, que viene excitado por sus frecuencias de resonancia. Una vez que uno o varios de estos modos de resonancia se excita en su frecuencia natural, se produce un enganche con la frecuencia de vibración de la cuerda, lo que da lugar a la resonancia del cuerpo y a la radiación del sonido, con sus parciales correspondientes. Por ello, cuantos más armónicos estén presentes en la vibración y más armónicamente se relacionen, mayor calidad tendrá el sonido producido. Sin embargo, como se puede apreciar en la gráfica anterior, los

modos de vibración, en el caso de los instrumentos de la familia del violín, no responden a una sola frecuencia, sino a un rango de varios semitonos.[10]

5.1. Métodos modernos de análisis

Varios autores han utilizado el método de análisis modal mediante la técnica de excitación impulsiva o de impacto, entre los cuales están Marshall y Jansson, Bork y Meyer. Martin Schleske realizó también un estudio para determinar las frecuencias de los modos propios de vibración determinando la admitancia de entrada y buscando picos ante una excitación controlada en frecuencia[14]. Menzel, Hutchins y Luke escanearon las placas con sensores ópticos. Técnicas de interferometría holográfica han sido empleados por Stetson y Powell, Jansson, Sundin y Molin, registrando un holograma de una placa en reposo y otro de una en vibración, creando así un patrón de interferencia entre ambos hologramas. Este método localiza las líneas nodales con gran precisión y ofrece una especie de mapa del desplazamiento de la amplitud en regiones antinodales. La desventaja que acarrea es la necesidad de mantener el instrumento fijo, lo que podría afectar a las formas modales.

La holografía electrónica se propone como un método adecuado para visualizar las formas modales en tiempo real e incluso permite la posibilidad de grabarlas. Haciendo uso de una cámara con dispositivo de carga acoplada se graban imágenes del objeto iluminado por láser. Un procesador electrónico de imagen crea interferogramas que pueden ser visualizados en un monitor, evitando el inconveniente de procesar film fotográfico. El resultado tendría el siguiente aspecto:

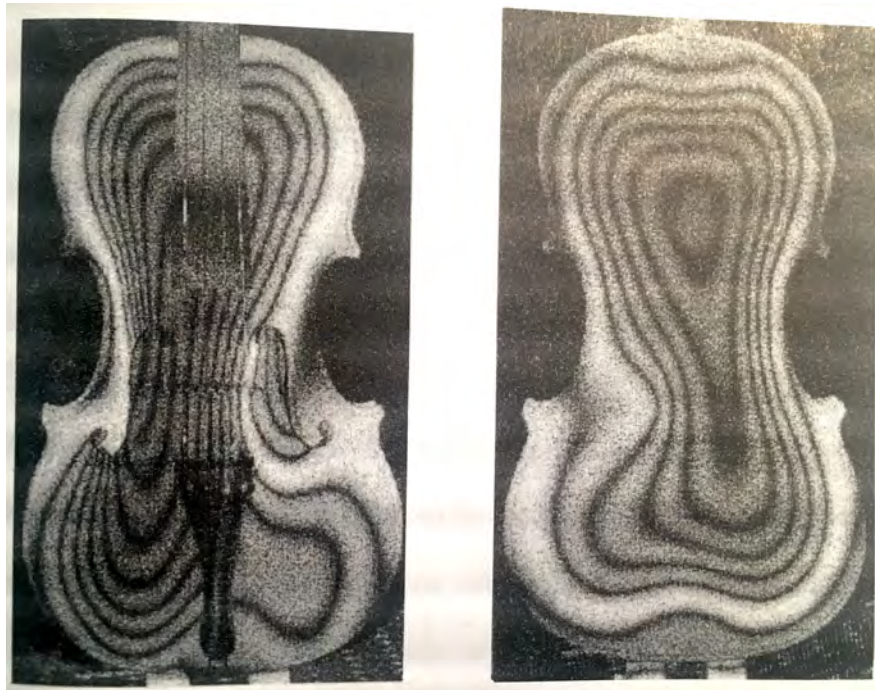


Figura 13: Interferogramas holográficos realizados por Saldner en 1996[15]

El análisis modal usando métodos estructurales también ha sido aplicado a violines de manera exitosa. José Antunes y Octávio Inácio propusieron un análisis modal linealizado introduciendo formulación y modelos matemáticos de gran precisión [16]. La excitación por impactos permite la investigación ante el movimiento producido en muchas frecuencias a la vez. La técnica habitual consiste en adherir un acelerómetro en uno de los puntos clave y golpear suavemente en un número elevado de puntos del instrumento (incluyendo puente, ceja, mástil, etc) con un martillo. Mediante las transformadas de Fourier de la fuerza y la aceleración es posible computar parámetros modales de interés, incluyendo frecuencias de resonancia, formas modales, amortiguamiento, etc. Es un método rápido para determinar modos de vibración en estructuras elásticas. Las formas modales determinadas mediante este método, si bien es cierto que no son tan precisas como las obtenidas por métodos holográficos más precisos, concuerdan con los resultados de estos.

Existen otros métodos para el análisis modal, como el escaneando del campo sonoro cercano a las superficies vibratorias con un micrófono y un

pequeño acelerómetro. Chladni²⁵ trató también de caracterizar los patrones de los modos propios con un método que consiste en espolvorear arena fina, serrín o algún otro tipo de partículas sobre las tapas sin ensamblar y someténdolas a vibraciones y señales de audio. Cuando la frecuencia de la señal emitida coincide con la frecuencia de resonancia de la placa, las partículas vibran con una forma determinada, permitiendo reconocer las líneas nodales, que indican zonas de no vibración. Las formas de Chladni resultan ser bastante efectivas a la hora de localizar los modos de las tapas libres (es decir, sin ser ensambladas aún en el instrumento), pero no las formas de violines finalizados. Cada uno de estos métodos mencionados en este apartado tienen sus ventajas y desventajas. Lo ideal es aplicar, no uno, sino varios de estos métodos, y cotejarlos a posteriori para establecer un resultado más ajustado y preciso.

5.2. Simulación por el método de elementos finitos

En este apartado haremos mención a un interesante artículo publicado por la Sociedad Española de Acústica titulado “*Análisis modal de la tapa superior de un violín con FEMLAB*”[17]. En él se hace una simulación cuyo objetivo consiste en modelar la tapa superior de un violín para realizar el análisis de los modos propios de vibración utilizando el método de elementos finitos. La idea de este método consiste en la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que definen el comportamiento del continuo caracterizarán también al elemento. Así, se consigue pasar de un sistema continuo con infinitos grados de libertad a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no.[18] Este método es una herramienta muy potente para el análisis modal de estructuras complejas. Es utilizado en numerosos campos como la física, mecánica de fluidos, propagación de ondas sonoras, etc. No obstante, no es un método exacto, sino que con él se realizan modelos de forma aproximada.

La simulación se lleva a cabo mediante el software FEMLAB, de la siguiente manera. En primer lugar, se establecen una serie de parámetros físicos tales como el Módulo de Young, el Módulo de Poisson y la densidad de la

²⁵Físico y músico alemán nacido en 1756, considerado por algunos como el padre de la acústica. Realizó contribuciones importantes a la comprensión de la vibración de tablas y la determinación de sus modos propios.

madera de la tapa superior, así como las dimensiones estándar de la tapa superior de un violín. En nuestro caso particular, el de la viola, las medidas son algo superiores, por lo que los resultados no corresponderán precisamente a los del estudio. Por ejemplo, para el largo de la caja se da una longitud de 355 mm, mientras que una viola utilizada por un músico adulto tiene una talla que se sitúa en un rango posible entre los 380 mm y los 420 mm aproximadamente. Por último, el espesor de la madera para todos los modelos que se verán a continuación es de 2,96 mm, resultado de calcular un promedio de distintos espesores de la tapa superior.

Una vez definidos los parámetros de partida comienza la simulación partiendo de una placa rectangular cuya longitud coincide con el largo de la caja, y cuya anchura es un promedio de los tres anchos posibles (en la parte superior, en el centro del cuerpo y en la parte inferior). Este modelado, aparte de la imprecisión de partida de la forma concreta de la tapa, tiene también la imprecisión de la curvatura de la tapa, la cual no se está teniendo en cuenta, ya que la placa rectangular se supone completamente plana. Se realiza un cálculo de las frecuencias de resonancia para los seis primeros modos, así como una simulación de máximos y mínimos. El resultado es el siguiente:

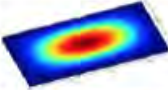
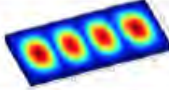
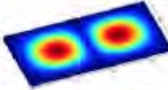
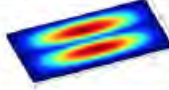
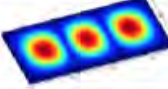
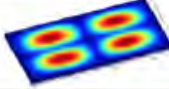
Modo 1 (1,1)	745.521 Hz		Modo 4 (4,1)	1867.525 Hz	
Modo 2 (2,1)	912.922 Hz		Modo 5 (1,2)	2367.130 Hz	
Modo 3 (3,1)	1261.515 Hz		Modo 6 (2,2)	2524.717 Hz	

Figura 14: Primer paso de la simulación [17]

El siguiente paso consiste en considerar ahora, no una placa rectangular, sino una placa compuesta por dos bloques de una longitud equivalente a la mitad de la longitud total de la tapa pero distinta anchura, según las medidas que toma para cada parte de la tapa, obteniendo ahora el siguiente resultado:

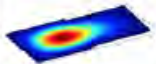
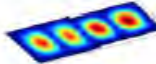
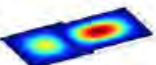
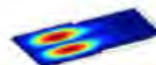
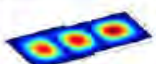
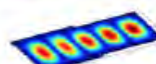
Modo 1 (1,1) ₁	775.052 Hz		Modo 4 (4,1)	1660.677 Hz	
Modo 2 (2,1)	981.512 Hz		Modo 5 (1,2) ₁	1954.657 Hz	
Modo 3 (3,1)	1248.782 Hz		Modo 6 (5,1)	2212.356 Hz	

Figura 15: Segundo paso de la simulación [17]

Los resultados son similares, aunque han de ser tenidas en cuenta las ligeras variaciones en cuanto a la forma de algunos modos, así como de las frecuencias. La cantidad de variación en la frecuencia no es regular tampoco en los distintos modos, puesto que en algunos casos hay una variación de unos 50 Hz mientras que en otros la variación alcanza las tres cifras. Al introducir discontinuidad en los lados de la placa hay entonces algunas variaciones, lo que hace que los máximos centrados se desplacen hacia uno de los extremos. Observamos entonces modos cuyos máximos están localizados y otros en que se encuentran distribuidos a lo largo de la placa.

El siguiente paso consiste en crear un modelo formado por tres bloques, cada uno de ellos con la anchura concreta de cada parte del cuerpo, obteniendo lo siguiente:

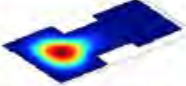
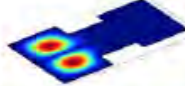
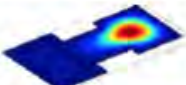
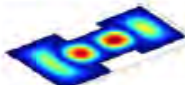
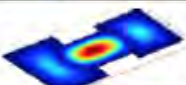
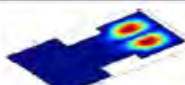
Modo 1 (1,1) ₁	845.643 Hz		Modo 4 (1,2) ₁	1548.840 Hz	
Modo 2 (1,1) ₃	1000.126 Hz		Modo 5 (2,1) ₂	1706.618 Hz	
Modo 3 (1,1) ₂	1357.798 Hz		Modo 6 (1,2) ₃	2102.465 Hz	

Figura 16: Tercer paso de la simulación [17]

Ahora los máximos no se distribuyen a lo largo de la placa, sino que

para cada modo se localizan en una región concreta. Las frecuencias asumen ahora una variación mayor. El siguiente paso consiste en añadir una cierta curvatura a los contornos, optando por un trazado en líneas circulares frente a un trazado más elíptico. Los resultados se muestran a continuación:

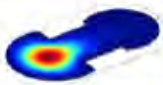
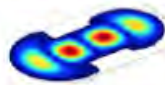
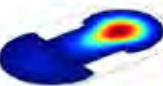
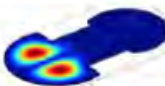
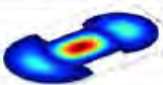
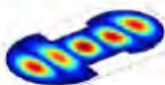
Modo 1 (1,1) ₁	918.066 Hz		Modo 4 (4,1)	1810.952 Hz	
Modo 2 (1,1) ₃	1053.480 Hz		Modo 5 (1,2) ₁	1827.905 Hz	
Modo 3 (1,1) ₂	1401.706 Hz		Modo 6 (5,1)	2317.479 Hz	

Figura 17: Cuarto paso de la simulación [17]

Se puede observar que los tres primeros modos son prácticamente idénticos a los del caso anterior, pero los tres siguientes son muy distintos, volviendo a aparecer máximos distribuidos por toda la superficie en el caso del sexto modo, así como un aumento de la frecuencia. El siguiente paso hila más fino. Partiendo de unos planos facilitados por un *luthier* se realiza un trazado en AutoCad y se importan a FEMLAB, aportando así una placa con una forma más precisa:

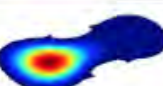
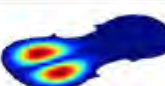
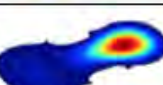
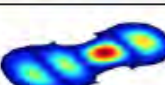
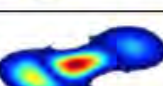
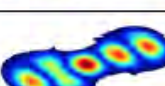
Modo 1 (1,1) ₁	729.172 Hz		Modo 4 (1,2) ₁	1529.506 Hz	
Modo 2 (1,1) ₃	1011.971 Hz		Modo 5 (4,1)	1732.048 Hz	
Modo 3 (1,1) ₂	1338.784 Hz		Modo 6 (5,1)	2236.734 Hz	

Figura 18: Quinto paso de la simulación [17]

Ahora se obtiene el valor de frecuencia fundamental más bajo, y las configuraciones modales siguen una especie de combinación de los ejemplos an-

teriores. Partiendo de este último modelo se introduce el elemento restante, las aperturas en forma de f que modifican el comportamiento modal del instrumento, y que son imprescindibles para permitir el flujo de aire entre el interior y el exterior de la caja armónica. Se obtiene lo siguiente:

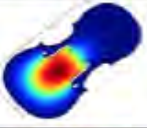
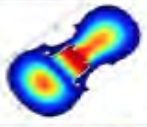
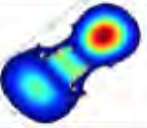
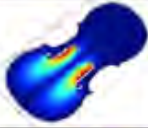
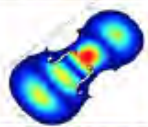
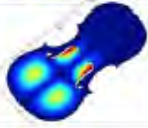
Modo 1	580.882 Hz	
Modo 2	939.098 Hz	
Modo 3	1039.855 Hz	
Modo 4	1269.894 Hz	
Modo 5	1603.013 Hz	
Modo 6	1656.312 Hz	

Figura 19: Último paso de la simulación [17]

El valor de la frecuencia fundamental desciende aún más en este caso. Al modificar la parte central no resulta tan evidente la asociación de máximos a una de las tres partes. Podemos eso sí, notar que los máximos tienden a asociarse a la posición de las f , lo cual es un indicador positivo, ya que es el elemento a través del cual se produce la máxima radiación y la mayor efectividad.

Concluye así el artículo que hemos mostrado brevemente, y que es de un gran interés. Ahora bien, ¿qué aporta a nuestro estudio? Podemos extraer unas cuantas conclusiones que nos resultan de gran ayuda y que tratamos a continuación.

5.3. Reflexiones

Dado que la viola está hecha a escala del violín, entendemos que la distribución de máximos y mínimos modales se sitúan en posiciones muy similares, con el correspondiente escalado. Conocer el comportamiento modal del violín nos permitiría aproximar el comportamiento de la viola, aunque no lo afirmaríamos a viva voz. Recurrentemente aparece en nuestro estudio el tema del escalado imperfecto que tiene la viola con respecto del violín, y es que,

aunque sabemos que es una necesidad física (las dimensiones reales de un escalado adecuado harían de la viola un instrumento impracticable) acarrea consecuencias físicas y acústicas que no pasan desapercibidas. Una de estas consecuencias es que la distribución de los modos sería la misma si la escala fuera exacta, pero no lo es. Esto podría ocasionar algún cambio en la distribución de los máximos y mínimos, aunque suponemos que las diferencias de patrones no serían muy diferentes.

La simulación se realiza además en base a unas medidas estándar del violín, que por lo general, son estáticas, y a partir de estas se calculan las frecuencias de cada modo. Pero ya hemos visto que, en el caso de la viola, el tamaño no es regular. Las violas tienen una caja cuyo tamaño puede variar entre unos 38 cm y 42 cm (o incluso más). Esto podría ocasionar que las frecuencias de cada modo (que por las dimensiones, serán menores en nuestro caso) varíen entre un instrumento u otro. Podría suceder que unas violas se sintieran cómodas vibrando a unas frecuencias u otras, lo que podría producir un desequilibrio en el balance, por ejemplo, de una sección en una orquesta. Cabría pensar también que se podría llegar a producir una disparidad tal que la eficacia de radiación sonora entre diferentes instrumentos fuera muy notoria para un registro u otro, obligando en consecuencia a los músicos a tomar conciencia de este hecho.

Por otro lado, si nos fijamos en la frecuencia fundamental que se calcula en la simulación en el último paso, 580.882 Hz, es esta muy cercana al Re₄ (D₅) que tiene una frecuencia de 587.330 Hz. Esto quiere decir que el instrumento, de manera natural, se encuentra cómodo vibrando y resuena en esta nota más que en cualquier otra. Además, el Re se encuentra relacionada tonalmente con La al ser la quinta justa de esta, por lo que los armónicos de ambas cuerdas de vibrarían por simpatía. El cuarto grado de la escala de Re mayor es el acorde de Sol mayor, que contiene al Re. Por último, la dominante (o quinto grado) de la escala de Re (tanto mayor como menor) es La, cuya quinta justa es Mi. Si nos fijamos en el violín, sus cuerdas se afinan en las notas Sol, Re, La, Mi, todas ellas relacionadas fuertemente en una tonalidad como Re Mayor, que en el caso del violín suena con gran brillantez. Y si hurgamos en el repertorio de violín, podemos encontrar obras de inmensa importancia escritas en esta tonalidad. No por casualidad. Por citar algunas de ellas, tenemos los conciertos para violín n^o 2 y 4 de Mozart, el concierto n^o 1 de Paganini, el de Beethoven, Brahms, Tchaikovsky, Prokofiev, Stravinsky, Korngold, el canon de Pachelbel y tantas otras obras que no cabrían en este trabajo.

Una última reflexión es inevitable. El análisis modal al que se ha hecho referencia se realiza sobre la tapa superior de un violín, pero sin esta ser ensamblada en el instrumento. Si nos fijamos en la fotografía de hace unas páginas donde se muestra un interferograma holográfico realizado por Saldner, o en los análisis de los modos hechos por Fletcher y Rossing, el alma, que es una pieza fundamental del instrumento, altera las formas de los modos, puesto que alrededor de ella se establece un nodo, provocando además la asimetría evidente de los patrones finales que tienen lugar en el instrumento final, que es en definitiva el importa. Esta simulación nos ofrece una idea acerca del comportamiento vibratorio de la tapa superior como una placa libre, pero estos patrones se deben analizar sobre todo teniendo en cuenta otros elementos, que ocasionan un comportamiento distinto al simulado, inevitablemente.

En el capítulo dedicado a las conclusiones del estudio (Sección 9) estableceremos una serie de líneas futuras de investigación que se extraen de este análisis.

6. El tono del lobo

A lo largo del presente trabajo han ido apareciendo referencias a un fenómeno que hemos denominado el *tono del lobo*, pero en ninguna de ellas hemos explicado en qué consiste. Ha sido objeto de diversos estudios por parte de científicos y músicos, que han tratado de comprender el complejo comportamiento acústico de los instrumentos de arco en una nota concreta, aportando también unas directrices a la hora de controlar esta disfunción acústica por parte de los intérpretes. Desde el punto de vista físico, este fenómeno se genera como resultado de un acoplamiento por medio del puente entre los dos sistemas resonantes de los que hemos venido hablando, las cuerdas y el cuerpo del instrumento, pero influyen también muchos otros factores.

Como vimos en apartados anteriores, Helmholtz [19] estudió en profundidad el mecanismo físico responsable del sonido de estos instrumentos, con el desarrollo del conocido movimiento de *stick-slip*. Además, identificó algunos parciales en los tonos de los violines utilizando *resonadores de Helmholtz* de diferentes tamaños. Raman²⁶, siguiendo con la investigación, escribió un artículo para la *Catgut Acoustical Society* [20] en que introduce el estudio del tono del lobo desde un enfoque temporal, e introduce el concepto de mínima presión del arco sobre la cuerda. Más adelante Schelleng [7] discute sobre la susceptibilidad de un violoncello ante este fenómeno, en el artículo que vimos en el capítulo dedicado al desarrollo de un circuito eléctrico equivalente desde las analogías aplicadas en acústica. Firth y Buchanan [21] confirman estos trabajos y aportan un paso ulterior mostrando que la aparición no viene ligada un tono puro sino para un rango de frecuencias (no muy grande, pero sí notoriamente superior a una delta de Dirac teórica). Autores como Gough [22], Woodhouse [11], McIntyre [23] y otros tantos continuaron estos estudios incluyendo simulaciones por ordenador y formulación cualitativa. Exploraremos en el presente capítulo la literatura referente a este concepto, y en particular haremos mención a un artículo escrito por Vicente Pastor, profesor del Conservatorio Superior de Música Joaquín Rodrigo de Valencia, y publicado en la Revista Española de Acústica, titulado “*Los instrumentos de arco y el tono del lobo*”.[10]

²⁶Chandrasekhara Raman, autor de origen indio, premio Nobel de Física en 1930 por el descubrimiento del llamado efecto Raman.

6.1. Marco teórico

El tono del lobo, según Pastor, es el resultado de una disfunción acústica que da lugar a un sonido fluctuante en frecuencia e intensidad. Ocurre cuando la frecuencia de oscilación de la cuerda coincide o se aproxima a la frecuencia principal de resonancia del cuerpo, donde pueden sobrevenir los problemas. Ya vimos en el apartado anterior cómo la frecuencia fundamental era un posible indicador del tono del lobo, y por eso consideramos de gran importancia la precisa determinación de la localización de esta. Como resultado de este acoplamiento (a Schelleng le sugiere la posibilidad de ser circuitos acoplados, en su concepción desde la analogía electrónica [5]), el músico pierde el control del modo momentáneamente. Sería muy ilustrador en este punto mostrar un vídeo o una grabación para percibir claramente en qué se traduce sonoramente este fenómeno, y cómo este afecta a la interpretación de un determinado pasaje.²⁷ Lo que uno escucharía sería parecido a cantar una nota concreta (y aguda) pronunciando “*trrr*”, un sonido que no es estable y limpio sino todo lo contrario, rugoso, inestable y bastante desagradable. Esto es un gran problema. Que un músico pueda ver comprometida su interpretación, el fraseo o el simplemente la ejecución de un pasaje, a causa de un punto concreto donde su instrumento se ve expuesto a que pueda aparecer un sonido desagradable no es algo que deba pasar desapercibido. Es algo que debe ser estudiado, determinado y, en caso de que pueda aparecer, tratar de combatirlo o al menos mitigar su efecto.

En condiciones normales, cuando se produce la coincidencia de la frecuencia de oscilación de la cuerda y el cuerpo con un acoplamiento débil, sobreviene la resonancia, lo que se traduce en un sonido rico y estable. Sin embargo, en la generación del tono del lobo coexisten varios factores que nos permiten caracterizarlo: el movimiento Helmholtz de las cuerdas, el mínimo de fuerza del arco requerido sobre la cuerda, la resonancia de la caja armónica y del aire contenido en ella, la oscilación acoplada entre dos sistemas resonantes, las pulsaciones y la impedancia como una función de transferencia de la energía o la fuerza. Veremos brevemente cada uno de ellos.

²⁷En el siguiente enlace mostramos un breve vídeo donde se aprecia claramente el tono del lobo. En todos los casos de ensayo hemos buscado la aparición o no de este efecto, y en uno ellos, relacionado con la posición del puente, fuimos capaces de determinarlo, así como la frecuencia de la nota en que aparece. Se muestra en el fichero una escala ascendente desde La \sharp 3/Sib3 (A \sharp 4/Bb4) por tonos enteros hasta llegar al Fa \sharp 4/Solb4 (F \sharp 5/Gb5) a la frecuencia de 739,989 Hz, donde aparece este efecto. <https://drive.google.com/file/d/1LWKxR7goeCe9cp6jLwKHnuHd9iEraSxd/view?usp=sharing>

En primer lugar tenemos el movimiento de las cuerdas, que ya hemos visto anteriormente, conocido como *stick-slip*. Según Pastor, el sonido en los instrumentos musicales depende de la vibración de un cuerpo en frecuencias estables, vibraciones que dependen de tres factores, a saber, desplazamiento, fuerza restauradora (que viene dada por la elasticidad o resistencia de los materiales vibrantes) e inercia. La forma de onda concreta fue determinada por Helmholtz mediante un microscopio de vibración propuesto por *Lissajous*, observando que cuando la cuerda se frota se forman dos líneas rectas con una curva en el punto de intersección, en lugar de la forma sinusoidal convencional, dando lugar a un movimiento en V. Esta curva viaja por toda la cuerda reflejándose en los extremos (que como vimos en el capítulo en que analizamos las partes del instrumento, son el puente y la cejilla).

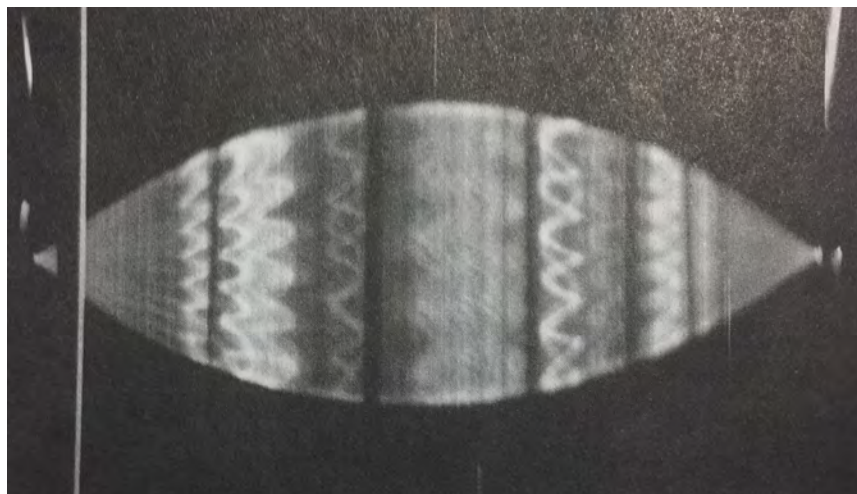


Figura 20: Patrón de Lissajous de una cuerda de acero que muestra movimiento de torsión y el conocido como movimiento Helmholtz [12].

El arco se adhiere a la cuerda moviéndose en la misma dirección (lo que constituye el factor desplazamiento), mientras el pulso de onda viaja al extremo derecho describiendo un patrón parabólico, se refleja y regresa (fase *stick*). En esta fase la cuerda se mueve a la velocidad de arco. Cuando llega la perturbación al punto de contacto con el arco, se desencadena la acción deslizamiento de la cuerda, y el pulso de onda viaja ahora al extremo izquierdo, hasta que la cuerda pasa por su punto de equilibrio y llega a su máximo

de amplitud. En esta segunda fase (fase *slip*), la velocidad relativa es igual a la velocidad del arco dividida por un factor proporcional a la distancia del arco desde el puente dividida por la longitud de la cuerda vibrante. En ese punto, de nuevo la cuerda es sujeta por las cerdas y se inicia un nuevo ciclo. De esta forma, la curva se compone de dos parábolas con una amplitud máxima que es proporcional, dentro de los límites, a la velocidad del arco. Cuando este ciclo sucede se constituye una onda estacionaria en la cuerda que almacena energía que se va realimentando mientras el músico continúa la acción del arco, y dicha energía es drenada por el puente hacia el cuerpo del instrumento. El movimiento tiene un patrón de forma de onda en dientes de sierra.

Raman, premio Nobel de Física en 1930, amplió esta formulación introduciendo en el concepto de Helmholtz la variable de amortiguación de la cuerda, la cual no había sido tomada en cuenta por él [20]. Schelleng añade en su artículo el concepto de mínimo de presión o fuerza del arco sobre la cuerda [5]. En un escenario normal, la cuerda presentaría al arco una impedancia no ambigua, que corresponde a un circuito en serie con una resistencia de valor positivo pero lo suficientemente baja como para ser similar a la impedancia de valor negativo del correspondiente al punto de contacto del arco con la cuerda. La reactancia pasa por cero en la frecuencia de operación. En contraste con esto, cabe la posibilidad de que para la curva de reactancia de una cuerda dada, no exista un punto de paso por cero, sino tres, con el consecuente peligro de inestabilidad. Benade²⁸ concluyó que el mínimo de presión del arco sobre la cuerda requerido para mantener las oscilaciones es proporcional además a la velocidad con la cual se mueve el arco a través de la cuerda. Cremer²⁹ añadiría algún factor más como la inarmonicidad [24].

La proporción de transferencia de las vibraciones de un medio a otro depende de la magnitud relativa de las impedancias de dos medios. La transferencia de energía entre ambos depende de la impedancia del puente para transmitir la fuerza conductora de las cuerdas, que puede ser medida. Para que se produzca resonancia tiene que haber dos elementos que vibren en frecuencias muy similares. En el caso de los instrumentos de la familia del

²⁸Arthur H. Benade, doctor en física por la Universidad de Washington en St. Louis. Recibió las medallas de plata y de oro de la Sociedad de Acústica de América por la excelencia de sus estudios en acústica musical.

²⁹Lothar Cremer, ingeniero alemán considerado uno de los principales científicos del siglo XX en el campo de la acústica técnica. Desde 1992, el premio a jóvenes talentos de la Sociedad Alemana de Acústica lleva su nombre.

violín los dos osciladores o resonadores son las cuerdas y el cuerpo, aunque el puente puede considerarse también como un resonador. El grado de facilidad mediante el cual las vibraciones pueden ser excitadas y sostenidas se conoce como *sensibilidad de vibración*, y esta permite estudiar y conocer los modos propios de vibración de ambos resonadores, como ya hemos visto anteriormente.

Otro fenómeno involucrado en el tono del lobo es el de oscilador acoplado. El efecto del acoplamiento de dos o más osciladores se puede describir como un intercambio gradual de energía entre ellos, en el que mientras uno oscila con la máxima amplitud, el otro cesa su oscilación, y viceversa. Si la influencia de uno sobre el otro no es muy grande, entonces el acoplamiento es mínimo y el sistema no se modifica. Por el contrario, si ambos sistemas interactúan notablemente, el acoplamiento es fuerte, lo cual se traduce en el tono pulsante que hemos mencionado anteriormente, donde las resonancias de ambos sistemas se alternan. En esta situación, en algún punto fijo las ondas están periódicamente en fase o fuera de ella, alternándose interferencia constructiva y destructiva.

6.2. Caracterización del fenómeno

El tono del lobo puede formularse aplicando un modelo lineal, pero también mediante una aproximación no lineal. Cuando se habla aquí de sistema lineal, Pastor indica que es aquel en el que la respuesta del sistema es proporcional al excitador o al estímulo. En una cuerda, la respuesta es lineal cuando la fuerza restauradora es proporcional al desplazamiento. La vibración resultante de estos sistemas es armónica, y pueden expresarse por tanto como un movimiento armónico simple. Sin embargo, en el sistema generado por la interacción del arco y la cuerda, las vibraciones no siguen un comportamiento lineal. El resultado no es un movimiento armónico simple, sino complejo, en el cual no es posible aplicar el principio de superposición para la solución de la ecuación. En este caso, la respuesta del sistema no es proporcional al estímulo o excitador, de forma que si se dobla la fuerza, por ejemplo, la respuesta no es el doble.

Aplicando una aproximación lineal, se puede analizar el acople en el dominio del tiempo entre los dos sistemas resonantes, que da lugar a dos frecuencias, una por sistema. Cuando la resonancia principal del cuerpo se excita, la cuerda requiere de más energía de la que el arco puede suministrar. Al pasar el arco por la cuerda en la frecuencia de la resonancia principal del

cuerpo, o próximo a ella, se establece el movimiento Helmholtz y la energía es drenada por el puente al cuerpo del instrumento. Cuando el cuerpo ya no puede almacenar más energía se produce retroalimentación energética en las cuerdas por parte de la vibración en el cuerpo, interrumpiendo la acción del arco sobre la cuerda y cancelando por tanto su vibración momentáneamente. El músico no ha cesado el movimiento del arco, por lo que la vibración de la cuerda se reactiva. Si ambas resonancias (la del cuerpo y la de la cuerda) son muy activas, el músico encuentra gran dificultad (o incluso le resulta imposible) suministrar la suficiente energía con el arco para mantener la energía de los dos sistemas. Esto provoca el tono pulsante, o pulsaciones producidas por la alternancia de resonancias. En esta situación, el músico no tiene control sobre su instrumento.

Si damos un paso más allá para considerar que el oscilador conductor depende de un elemento externo, el arco, que introduce dos variables que son la velocidad del arco y la presión ejercida contra la cuerda, la aproximación lineal basada en el movimiento armónico simple ya no es válida. Una característica de los sistemas no lineales es la generación de nuevas frecuencias gracias a componentes adicionales y diferenciales que resultan de sumas y restas de varios armónicos presentes en la vibración. Estos influyen en el timbre y el tono del lobo, y han sido ampliamente desarrollados en los estudios de Benade.

Según Raman, cuando se produce el tono del lobo, el cuerpo del instrumento vibra de una manera inusual, y está incluido en este efecto la acción de vibración por simpatía de la resonancia del instrumento. Habla de una variación cíclica de la intensidad del tono por efecto de forzar al instrumento a un determinado comportamiento. Los pequeños golpes que se producen cuando una fuerza periódica actúa en un cuerpo vibrante son esencialmente de carácter transitorio, pero en este caso, las fluctuaciones en intensidad son persistentes. El efecto, como hemos visto, depende de un factor de fuerza del arco sobre la cuerda, y Raman habla de un valor crítico. Cuando esta presión del arco es menor que un cierto valor crítico proporcional al ratio de disipación de energía de la cuerda, el principal modo de vibración en que la fundamental es dominante, es incapaz de ser mantenido y pasa a uno donde la octava es prominente [20].

Cuando el arco hace vibrar la cuerda, el instrumento es fuertemente excitado por resonancia por simpatía y el ratio de disipación de energía se incrementa rápidamente y continúa incrementándose más allá del límite en el cual el arco puede mantener la vibración de la cuerda de una manera nor-

mal. La forma de vibrar que tiene la cuerda en este momento se altera y pasa a una forma de vibración en que la fundamental es más débil en comparación con la octava, decrementándose así la amplitud de la vibración del cuerpo. Cuando el ratio de disipación de energía vuelve a caer de nuevo por debajo del límite crítico, la cuerda comienza a recuperar su forma original de vibración con la dominante fundamental. Esto prosigue de la misma manera tras un intervalo en que se produce el incremento de la vibración en el cuerpo del instrumento y este ciclo se repite una y otra vez de manera indefinida.

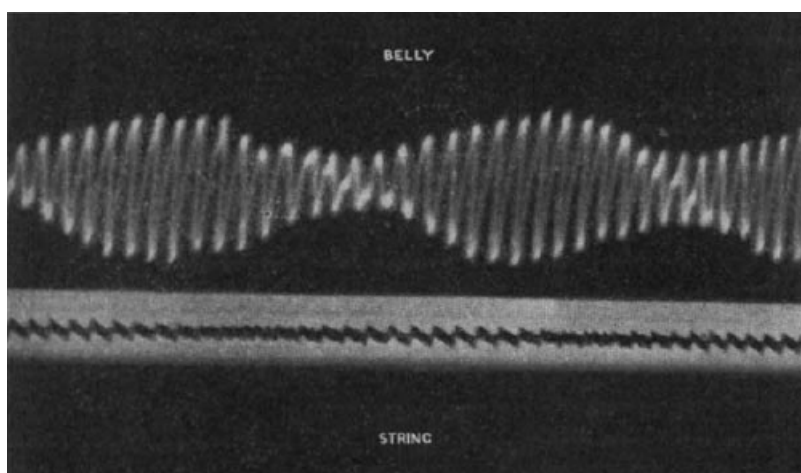


Figura 21: Simulación de la evolución de las curvas de vibración del cuerpo y de la cuerda, realizado por Raman en el año 1916. [20]

Por consiguiente, desde el punto de vista lineal, puede explicarse el tono del lobo en términos de sistemas acoplados y pulsaciones. Se trata de la interacción de dos frecuencias que están producidas por el mismo excitador, aunque provienen de orígenes distintos, una de la cuerda y otra del cuerpo. Como resultado de esta oscilación acoplada entre dos frecuencias de resonancia, la frecuencia fundamental del oscilador conductor se divide en dos frecuencias, una por encima y otra por debajo de la fundamental. Schelleng añade que, cuando surge el tono del lobo, los armónicos pares se mantienen estables durante un ciclo, mientras los impares van creciendo y decreciendo periódicamente [5].

El tono del lobo también puede explicarse también utilizando el concepto de impedancia en el puente. En condiciones normales, el puente provee una

fuerte reflexión a las oscilaciones de las cuerdas, lo que permite constituir una onda estacionaria estable. Pero a las resonancias del puente, se sigue intuitivamente que la impedancia es mínima, favoreciendo una transferencia de valor máximo. Cuando interactúan ambos sistemas oscilantes, la impedancia del puente se reduce de tal forma que se producen las vibraciones descontroladas e irregulares de las que hablaba Raman, y la energía ya no se drena por el puente. Benade sugiere que el puente podría considerarse como una palanca de acoplamiento entre las cuerdas y el cuerpo para aquellas frecuencias por debajo del primer modo de resonancia del puente [25].

Para concluir este apartado ha de ser tenido en consideración un hecho. En todos y cada uno de los ensayos que hemos realizado para este trabajo, y que desarrollaremos en apartados posteriores se ha buscado provocar este efecto. Para explorar de manera práctica la posible aparición de este fenómeno en los diferentes instrumentos que hemos utilizado para el análisis, así como todos los escenarios posibles que hemos valorado, sometiéndolos a las condiciones que hemos desarrollado, hemos hecho sonar cada instrumento en todas sus notas posibles, haciendo especial hincapié en aquellas relacionadas con las frecuencias fundamentales, aplicando los principios del punto de contacto con la cuerda y mínimo de presión ejercida por el arco. Solamente en uno de ellos hemos observado la aparición de este fenómeno, que venía asociado a un ensayo basado en una desviación de la posición del puente. En concreto, en este instrumento habíamos situado el puente por encima de su localización teórica e implementada por un *luthier*. En este escenario concreto hemos encontrado el lobo a una frecuencia de 739,989 Hz correspondiente al Fa \sharp 4/Solb4 (F \sharp 5/Gb5). En el apartado dedicado al puente mostraremos consecuentemente el peligro de situar esta pieza en una posición inadecuada, provocando entre otros hechos, el aumento de la susceptibilidad del tono del lobo para el instrumento.

6.3. Susceptibilidad y control

Aunque el tono del lobo puede acaecer en cualquier instrumento de cuerda, por los criterios que hemos desarrollado en este capítulo, no todos los instrumentos de la familia son igual de proclives a presentarlo. Por un lado, influye la diferencia de impedancias entre las cuerdas y el cuerpo que es diferente en cada instrumento. Por otro lado, debe ser tenida en cuenta la diferencia de forma de los puentes. Por último, debe ser tenido en cuenta el escalado imperfecto bajo el que se construyen viola, violoncello y con-

trabajo. Es interesante la propuesta de Schelleng de mostrar gráficamente las condiciones de susceptibilidad de los distintos protagonistas, mostrada a continuación:

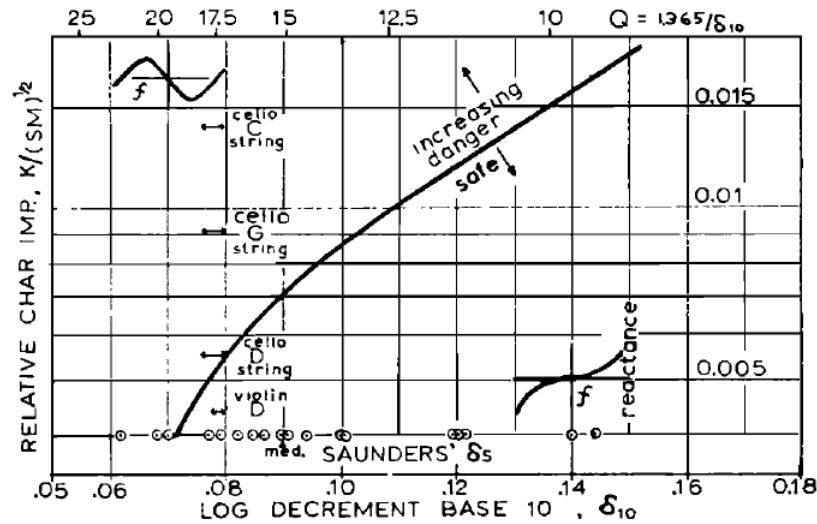


Figura 22: "Wolf tone criterion" representado por Schelleng [5]

El eje vertical muestra la impedancia característica relativa para diferentes casos de cuerdas, tanto del violín como del violoncello, responsables de producir la resonancia del instrumento en la frecuencia fundamental. Para la cuerda D (Re) del violoncello el punto cae cerca de la zona segura, como la experiencia confirma. Para la cuerda G (Sol) del violoncello, el punto cae fuera de la "zona segura", hecho confirmado también en la práctica. El punto que representa la cuerda del violín indica una relativa libertad respecto del tono del lobo. En el caso de la viola, tres de las cuerdas del violín se comparten, una más gruesa y de frecuencia más grave se añade (la cuerda de Do) mientras que la cuerda del violín más aguda (la de Mi) no está presente. Esto nos sugiere una cierta libertad en la viola, al menos en lo que se refiere a este factor, aunque ya hemos visto que no es el único que influye.

El caso del escalado imperfecto es también un factor que influye en la aparición de este fenómeno. Ya vimos que un escalado exacto no supondría un problema teórico, pero no es practicable ya que el instrumento demandaría una fuerza y un tamaño del músico inexistentes o, al menos, inviables. Sche-

lleng continúa en su estudio haciendo un análisis de los diferentes parámetros que entran en juego proponiendo una formulación para el efecto de dicho escalado en parámetros como la impedancia del cuerpo o la rigidez, entre otros, aplicándoles unos factores de escala calculados teóricamente para la viola y el violoncello, y partiendo de una aproximación para el violín. Concluye su estudio que los problemas relacionados con el tono del lobo se incrementan en la viola y más aún en el violoncello. Añade que la crónica susceptibilidad del tono del lobo en el violoncello es el precio a pagar por la conveniencia de un instrumento pequeño y practicable en relación con uno perfectamente escalado.

Varios métodos han sido desarrollados para controlar o eliminar el lobo de un instrumento. Podemos clasificarlos en dos grandes grupos, a saber, los métodos exógenos (pequeños dispositivos instalados) y los endógenos (aplicados por el propio músico en el curso de la ejecución, como el control del peso del arco o el punto de contacto para reducir la energía de vibración de la frecuencia de resonancia donde se genera.). Podemos nombrar los famosos *matalobos* para violoncello, que consisten en una especie resonador pequeño con alto coeficiente de amortiguamiento. Normalmente consisten en una pequeña masa de forma cilíndrica, de metal y forrado en caucho en su interior, que se afina en la misma frecuencia de resonancia del cuerpo donde se genera el lobo, amortiguando el sonido del modo de resonancia, pero sin afectar prácticamente a otras resonancias [10]. Podría ser entendido como una suerte de filtro paso banda eliminada en la frecuencia crítica, dejando como función de transferencia 1 para el resto del espectro.

7. Estudio del timbre e intercomparación

El timbre de un sonido es la cualidad que permite diferenciar dos sonidos de igual altura e intensidad, pero de diversa procedencia. Depende del grado de complejidad del movimiento vibratorio que origina dicho sonido. A diferencia de otros parámetros como la altura (caracterizada por la frecuencia, medida en Hz) o la intensidad (medida, por ejemplo, en dB), no es mensurable, ni existe por tanto una unidad que permita comparar timbres de distintos sonidos. Un mismo cuerpo puede producir varios sonidos según las condiciones en que vibre. El más grave de esos sonidos es la frecuencia fundamental y los demás se llaman parciales, que pueden ser armónicos, si son semejantes a la serie armónica derivada de la misma fundamental, también llamados concordantes o alícuotas, o bien, si los parciales no son semejantes a la serie armónica, estos serán discordantes y no se les llaman armónicos, recibiendo el nombre de sobretonos [26].

El número de armónicos que forman el timbre de cada sonido depende del cuerpo que lo produce y de la manera de excitar a éste. Así por ejemplo entre dos notas iguales producidas por instrumentos distintos como el piano y el violín, presentan una característica distintiva que es el timbre. Los armónicos que se pueden escuchar de cada uno de estos sonidos serán distintos en cuanto a intensidad y a la distribución de energía entre ellos. Los dos sonidos tienen los mismos armónicos en frecuencias, pero la distribución de las intensidades es distinta.

7.1. El timbre y la calidad del tono

Los físicos, teniendo en mente formas curvilíneas, que representan la ley del movimiento de los cuerpos sonoros, hablan de la forma de vibración de un cuerpo sonoro y afirman que la calidad del tono depende de esta. Cada calidad de tono diferente requiere una forma de vibración, pero por otro lado, diferentes formas de vibración pueden corresponder a la misma calidad de tono. Cuando el oído pone su atención en el efecto de las vibraciones que inciden en él, no escucha meramente un tono musical cuya altura está determinada por el período de las vibraciones (lo que teóricamente podríamos comprender como un tono puro), sino que además de este, que es considerado el *primer tono parcial* o *fundamental* aparecen series de tonos musicales de mayor altura llamados por Helmholtz *armónicos parciales superiores*. Esta ristra de parciales superiores es la misma para todos los tonos musicales com-

puestos, aunque no todos los instrumentos los excitan de la misma manera. La calidad del tono depende de la forma de vibración, que determina la ocurrencia de los tonos parciales superiores. Siguiendo el estudio de Helmholtz podemos analizar cómo se compone esta serie:[19]

- El primer tono parcial superior es la octava superior a la fundamental, y realiza el doble de vibraciones por segundo (la frecuencia de este tono es el doble de la fundamental).
- El segundo tono parcial superior es la quinta justa desde esta octava superior, lo que corresponde a una frecuencia que es tres veces la fundamental.
- El tercer tono parcial superior es la segunda octava superior a la fundamental, y corresponde a cuatro veces la frecuencia de esta.
- El cuarto tono parcial superior es la tercera mayor desde esta segunda octava superior, y su frecuencia corresponde a cinco veces la fundamental.
- El quinto tono parcial superior es la quinta justa desde la segunda octava superior a la fundamental, lo que equivale a seis veces el valor de su frecuencia.
- Si seguimos en adelante, haciéndose cada vez más débiles, encontramos también parciales superiores sucesivos, correspondiendo a los siguientes múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.



Figura 23: Representación en notación musical de los parciales superiores partiendo del Do1 (C2) elaborada por Helmholtz [19]

Joseph Fourier elaboró el teorema según el cual toda onda periódica compleja (como lo son las ondas sonoras) puede descomponerse en suma de términos armónicos simples cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la rapidez de repetición de la onda. Esto se conoce como *sucesiones o series de Fourier*. Por tanto, para una onda compleja, su amplitud en función del tiempo $\Psi(t)$ puede expresarse como una sucesión de términos senoidales y cosenoidales (armónicos), donde:

$$\Psi(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t) \quad (3)$$

donde a_0 es un término constante que corresponde al valor promedio de la función $\Psi(t)$ y a_1, a_2, \dots y b_1, b_2, \dots son las contribuciones de cada armónico puro a la frecuencia fundamental de la misma según la expresión:

$$\omega = 2\pi f \quad (4)$$

donde $\omega, 2\omega, 3\omega \dots$ son las frecuencias angulares de los armónicos primero, segundo, tercero, ...

La idea final es que todo sonido musical, cualquiera que sea su timbre, puede obtenerse por adición de un número infinito de armónicos, aunque en la práctica es posible aproximar bastante la forma concreta de una onda sonora por la adición de unos pocos armónicos [26].

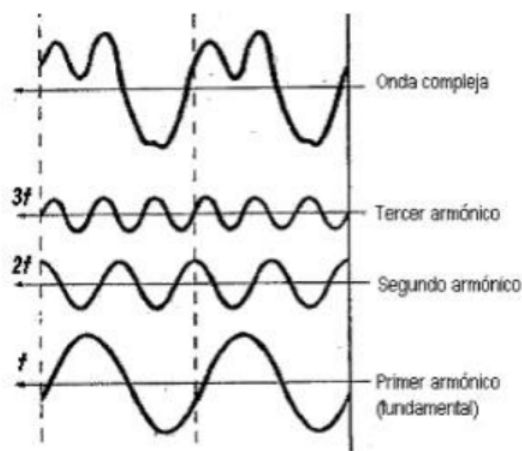


Figura 24: Representación de una forma de onda sonora compleja compuesta por la fundamental y la adición de dos armónicos [26]

Ciertas peculiaridades características en los tonos de bastantes instrumentos dependen también del modo en que comienzan y acaban. No obstante, no podemos centrarnos en estas particularidades, sino que confinaremos nuestra atención a las características del tono mientras este suena de una manera uniforme y regular. Helmholtz, en su obra titulada *On the Sensations of Tone*³⁰ continúa sus investigaciones acerca de la calidad de los tonos musicales dando tres pasos sucesivos [19]. Primero estudia los tonos musicales puros, sin parciales superiores, atómicos en el sentido más puro de la palabra, esto es, no descomponibles. De estos afirma que solamente diferirán en fuerza, pero no en calidad musical. De hecho, la posible diferencia podría residir en la capacidad de ser perfectamente indistinguibles.

El siguiente paso que da consiste en el estudio de aquellos tonos que, aparte del fundamental, poseen parciales superiores, pero estos no armónicos. En sentido estricto, no son reconocidos como tonos musicales, aunque son excepcionalmente utilizados en la música siempre y cuando el tono fundamental posee mucha más potencia que los tonos parciales superiores, hasta

³⁰Presentada por el autor como una base psicológica para el desarrollo de una teoría de la música, esta obra, que es uno de los mayores trabajos científicos del mundo, es citada por la mayoría de autores que realizan investigaciones en acústica musical.

el punto que estos pueden ser ignorados. Por ello, muchas veces se consideran pertenecientes al grupo anterior, casi como tonos puros. Un ejemplo de un sonido de este tipo es el generado por un diapasón, cuyos parciales inarmónicos superiores se encuentran a frecuencias muy altas. A partir de este paso, Helmholtz continúa su desarrollo analizando los tonos generados por cuerdas, tubos de órgano, vocales, etc.

Haremos una breve mención al apartado en que trata la cuerda frotada. Afirma así que, cuando la cuerda de un violín "suena bien", todos los tonos parciales superiores que pueden aparecer en una cuerda de su grado concreto de rigidez están presentes, y su intensidad disminuye a medida que la altura del sonido generado también disminuye siguiendo un escalado concreto. La amplitud y la intensidad del segundo parcial superior es una cuarta parte de la fundamental, el tercer parcial es una novena parte, el cuarto una decimosexta parte, y así sucesivamente. Permitirán la producción de armónicos al menos hasta el segundo parcial superior con relativa facilidad, y con mayores dificultades llegará hasta el decimo. Los tonos fundamentales tienen, en comparación, mayor potencia que los producidos por el piano o la guitarra, si bien es cierto que los primeros parciales serán algo más débiles. Los parciales superiores más altos (entre el sexto y el décimo) son mucho más distinguibles, lo que da a los tonos de estos instrumentos su carácter. En este punto introduce también la importancia de la habilidad del músico para producir el sonido con el arco, condición que era mucho menos determinante en el caso del piano o la guitarra. La variación de calidad del tono generado también dependerá de este hecho.

Otro factor que aparece es la uniformidad de vibración. Realizó experimentos con violines de gran calidad y capturó la forma de vibración que estos generaban. Con un violín moderno de gran calidad construido por Bausch³¹ le resultó fácil mantener el patrón vibratorio de la cuerda durante algunos instantes de tiempo, pero que aún tuvo mayor éxito al intentarlo con un violín italiano antiguo construido por Guadagnini³². Esta uniformidad de vibración es, para él, una evidencia de la razón del tono más puro de estos instrumentos antiguos, así como cualquier pequeña irregularidad en la producción del sonido es percibida inmediatamente por el oído.

³¹Importante constructor de violines y arcos.

³²Giovanni Battista Guadagnini, legendario constructor veneciano del siglo XVIII considerado uno de los mejores artesanos de instrumentos de cuerda de la historia.

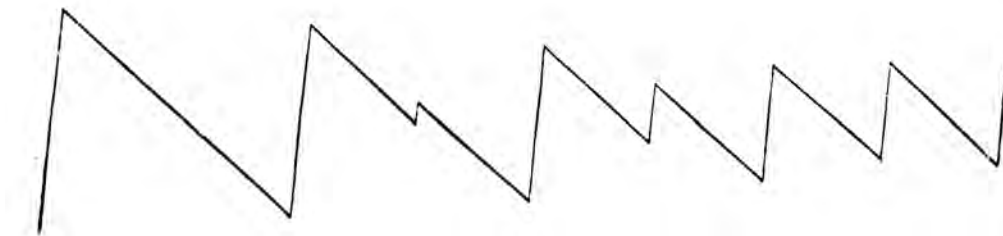


Figura 25: Patrón de vibración casi uniforme generado por un violín Guadagnini [19]

Una estructura apropiada, madera de la más perfecta elasticidad procurable, son probablemente las condiciones más importantes a la hora de conseguir vibraciones regulares en la cuerda, y cuando estas condiciones están presentes, el arco puede fácilmente hacerlas vibrar uniformemente. Esto permite un flujo tonal puro y limpio. Adicionalmente, cuando las vibraciones son tan uniformes, el arco puede atacarlas con mayor vigor y precisión. Los mejores instrumentos, en consecuencia, permiten un mayor y más vigoroso movimiento de las cuerdas, y casi toda esa intensidad de tono puede ser comunicada al aire contenido en la caja sin apenas disminución. Muchas de las ventajas de los violines antiguos dependen también, de alguna manera, de su edad y largo uso, dado que ambas condiciones pueden influir en la elasticidad de la madera.

7.2. Descripción del ensayo y justificación teórica

Hemos visto en este capítulo que la calidad del tono de los instrumentos de cuerda frotada, y en nuestro caso particular, el de la viola, depende múltiples factores como, por ejemplo, la cantidad de armónicos que se encuentran presentes cuando se produce el sonido, la relación existente entre ellos, la habilidad del músico para producir dicho sonido con el arco o la uniformidad de vibración las características de la madera, entre otros. Incluimos también (como demostraremos en el siguiente capítulo) al puente, la calidad de su construcción y su localización en el cuerpo del instrumento, etc. Muchos son, por tanto, los aspectos que han de ser considerados a la hora de juzgar la calidad objetiva del tono de un instrumento de esta familia, y algunos de ellos no son trivialmente extrapolables, como lo es por ejemplo la acción del músico. En este punto del trabajo propondremos un ensayo con un escenario bien

definido y unas condiciones concretas con el que trataremos de visualizar, mediante representación de espectros, la respuesta en frecuencia de varios instrumentos de diferentes dimensiones y calidad gradual. Una vez obtenidas dichas gráficas, elaboraremos un análisis de los resultados y someteremos las violas a juicio, para determinar su calidad objetiva relativa en el grupo propuesto.

El primer punto del que queríamos desligar nuestro ensayo era la acción del músico. Por varias razones, todas ellas evidentes. La primera y más clara es que resultaría prácticamente imposible lograr una emisión controlada de un tono concreto, con una potencia igual (o al menos muy similar) en todos los casos, con un efecto producido por el arco completamente regular en presión, velocidad, cantidad de resina, tensión de las cerdas, etc. Somos conscientes de que realizar un ensayo desligado de la acción del músico y del arco es en cierto modo artificial, ya que estaríamos caracterizando un sonido que, en definitiva, no es el que se va a producir o buscar en la práctica. No obstante, consideramos conveniente renunciar a esto en pos de lograr una objetividad mayor y unas condiciones de ensayo más estables y controlables. Si entonces queremos conseguir que el instrumento produzca sonido (más aún, su sonido propio), hemos de buscar una manera de producir la vibración de las cuerdas de un modo alternativo, y buscando un sonido regular en la medida de lo posible, sin que un músico la toque siquiera. La solución a esta cuestión viene de la mano del concepto de *vibración por simpatía*, desarrollado también por Helmholtz.

Este fenómeno se presenta en aquellos cuerpos en los que, una vez puestos en movimiento por algún tipo de impulso, continúan realizando una serie de vibraciones antes de llegar a un punto de reposo. Estos cuerpos poseen, como hemos visto, una frecuencia fundamental de vibración. Cuando entonces un cuerpo similar, pero ajeno a estos, comienza a vibrar de manera regular mediante impulsos periódicos, y dichas vibraciones se producen a una frecuencia igual o muy similar a la frecuencia fundamental del primer cuerpo, este, tras unos breves instantes comienza a vibrar considerablemente [19]. Siguiendo este razonamiento, si nos encontramos en una sala en la que se encuentra una viola en reposo cuyas cuerdas pueden oscilar libremente (por ejemplo, estando apoyada en una mesa o colgada), y estas se encuentran correctamente afinadas en sus respectivas frecuencias (las que hemos visto en el apartados anteriores), si con otra viola ejecutamos una nota correspondiente a una de las cuatro cuerdas al aire, al estar en la misma frecuencia (o muy similar) la cuerda correspondiente en la primera viola comienza a resonar por simpatía,

produciéndose sonido en ella sin siquiera tocarla. Cuando la altura correspondiente al sonido del cuerpo que genera el sonido es exactamente la misma que aquella que generaría el cuerpo que va a ser excitado por simpatía, la vibración que se produce es máxima, pero a medida que se aleje de dicha altura, el cuerpo se hará cada vez menos sensible a dichas vibraciones por simpatía, y la oscilación producida disminuirá en amplitud. Los cuerpos de masa pequeña, que fácilmente comunican su movimiento al aire, como por ejemplo, las cuerdas de la viola, son muy susceptibles de ponerse a vibrar por simpatía, por lo que los rangos frecuenciales en que se produce este efecto son algo mayores.

Aprovechando este fenómeno físico podemos plantear entonces el siguiente ensayo. Vamos a buscar caracterizar el timbre de diferentes violas en su respuesta a las notas correspondientes a las frecuencias de afinación de las cuerdas al aire. El instrumento, como hemos visto, solo posee cuatro cuerdas, y estas están afinadas en Do₂ (C₃), Sol₂ (G₃), Re₃ (D₄) y La₃ (A₄). Estas son las frecuencias que buscaremos excitar por simpatía. Introduciremos el instrumento en una cámara anecoica, y lo colgaremos de un soporte, encontrándose suspendido de un cordón fino que sostendrá el instrumento por la voluta, lo más lejos posible del cuerpo, a fin de no interactuar o modificar la vibración producida por este. Para impedir que el instrumento se pueda girar colocaremos unas espumas a los lados de la caja armónica que hagan contacto mínimo con el instrumento pero no permitan el movimiento. El material de dichas espumas es muy absorbente (su composición es la misma que la de las espumas que se sitúan en las paredes de la cámara), lo que hace que no se produzcan reflexiones que puedan alterar el resultado del ensayo.

A dos metros del instrumento, y situado para buscar la incidencia frontal con el instrumento, colocamos un altavoz mediante el cual emitiremos tonos puros correspondientes a las frecuencias de interés. El sonido producido por el conjunto de altavoz más instrumento será capturado por un micrófono de medida Brüel & Kjær de campo libre, de 1/2", modelo 4188-A-021 cuya sensibilidad es de 31,6 mV/Pa. Se situará a escasos centímetros de uno de los orificios en forma de f , y se situará de tal manera que reciba del altavoz desde el ángulo de 180°, a fin de minimizar su aportación, ya que su patrón de directividad es de tipo cardioide. Haciendo uso del software Brüel & Kjær PULSE generaremos los tonos puros, que aunque se aproximen mucho a una delta teórica no lo son, y además, la emisión vendrá condicionada por la respuesta del altavoz, que eventualmente generará algún armónico no deseado. Por ello, para la comparación de los espectros se capturará también el

obtenido durante la emisión del altavoz, pero sin instrumento alguno. Los espectros se capturarán utilizando filtros de ancho de banda lineal, con el analizador de tipo FFT (*Fast Fourier Transform*) y también porcentual con el analizador CPB (*Constant Percentage Band*). Los datos obtenidos serán exportados a Excel y procesados posteriormente con Matlab. El ensayo se repetirá siguiendo el mismo procedimiento para los diferentes casos que trataremos.

Adicionalmente se realizará una grabación de una escala de Do mayor en tres octavas, así como un pequeño pasaje, que será analizado mediante Matlab haciendo uso de herramientas de análisis musical como *MIRToolbox*. En cada uno de los ensayos se procederá a la búsqueda del tono del lobo, situado teóricamente en torno al Fa \sharp 4/Solb4 (F \sharp 5/Gb5) correspondiente a una frecuencia de 739,989 Hz, pudiéndose encontrar en frecuencias algo inferiores o superiores.

Puesto que hemos hecho uso de la teoría de vibración por simpatía para producir el sonido, la afinación de las cuerdas se ha comprobado constantemente, buscando que esta sea lo más precisa posible con respecto a las frecuencias de los tonos emitidos por el altavoz. Hemos visto que un cuerpo de pequeña masa como es el caso de las cuerdas de la viola es muy susceptible de ser excitado por simpatía, pero su respuesta disminuye a medida que la afinación de ambos sonidos es diferente. Comprobar la afinación de las cuerdas constantemente nos llevará a aproximar que en todos los casos, la respuesta de la cuerda ha sido cercana a su máximo.

Dado que vamos a realizar una serie de medidas acústicas, es fundamental hacer la siguiente puntualización. Al inicio y final de cada una de las medidas se comprueba la calibración del micrófono utilizando un calibrador que emite un tono puro de 94 dB a una frecuencia de 1 kHz. En prácticamente todos los casos, el micrófono capturó 92,2 dB a la frecuencia de 1 kHz, produciéndose como máximo una desviación de 0,1 dB entre la medida al inicio y la medida al final.

Por último, hemos comprobado que las condiciones de temperatura y humedad en el interior de la cámara anecoica, así como las de los instrumentos, era similar, aunque es un factor cuya influencia hemos considerado su despreciable.

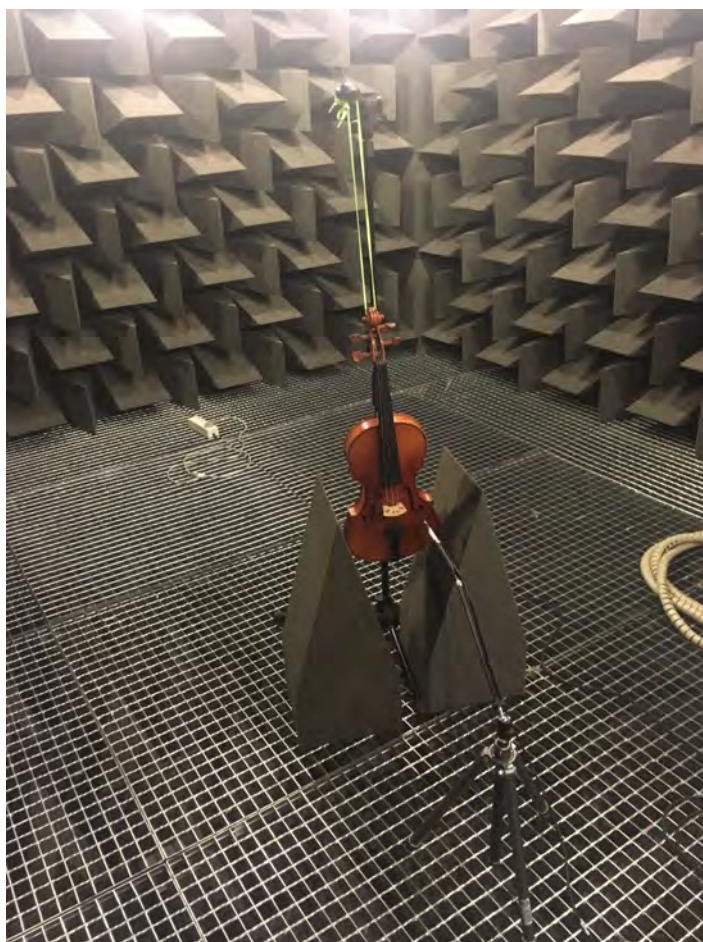


Figura 26: Fotografía del ensayo propuesto

7.3. Intercomparación del timbre de distintos instrumentos

Para esta serie de experimentos, hemos realizado una intercomparación de las respuestas de cuatro instrumentos diferentes, de calidad gradual y diferente tamaño, cuya descripción viene dada en el inventario (Sección A), al final del presente trabajo. Las gráficas que vendrán representadas a continuación representan los espectros obtenidos con el analizador FFT, que tiene filtros de ancho de banda constante. Hemos utilizado la transformada rápida

de Fourier y no un analizador de tipo CPB por la resolución que nos ofrece. Esta es constante en todo el rango de frecuencias que nos interesa, mientras que en un analizador CPB la precisión es cada vez menor a medida que aumentamos la frecuencia. Tiene la ventaja de que nos permite hacernos una mejor idea de cómo escucha el ser humano, pero hemos preferido afinar en la determinación de los armónicos y sus frecuencias concretas, y no hacer análisis de bandas cuyo promedio energético puede falsear la información. El estudio del timbre de estos instrumentos diferentes nos dará una idea precisa del número de armónicos que están presentes en cada uno de los casos para los diferentes registros tonales.

7.3.1. Cuerda de Do

Si tomamos la respuesta en frecuencia del altavoz obtenida al emitir un tono puro en la nota de Do₂ (G₃), que corresponde a 130,813 Hz podemos observar lo siguiente:

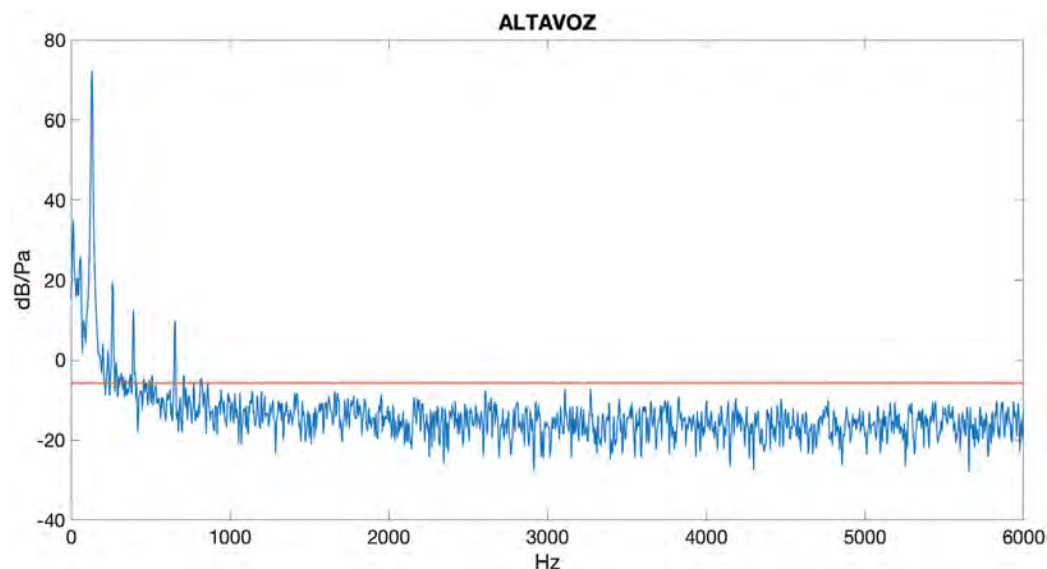


Figura 27: Espectro obtenido en la emisión de DO solamente con el altavoz.

Podemos observar que, aunque nosotros generamos mediante el software un tono puro a 130,813 Hz, la respuesta del altavoz introduce el primero, el segundo y el cuarto armónico con una potencia no despreciable. Para

separarlos hemos aplicado un umbral sobre el cual resaltan por encima del resto de la señal (lo hemos establecido en $-5,7$ dB/Pa). Es por ello que, al examinar los armónicos que constan en las gráficas relativas a la respuesta de las violas, no seremos capaces de diferenciar con cuanta potencia resonarían en el instrumento, es más, ni siquiera seríamos capaces de determinar si estarían o no presentes en una emisión normal. Es parte de la incertidumbre de nuestro ensayo. A partir del cuarto armónico (que para el caso del altavoz los posteriores ya caerían bajo el umbral que hemos establecido) sí podríamos concluir que provienen del propio instrumento.

Si nos fijamos detenidamente en los armónicos de Do que se presentarán en las siguientes gráficas de las respectivas violas, observamos, como era de esperar, que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, aunque no todos están presentes. Haremos una tabla presentando cuáles serían las frecuencias de los diferentes armónicos y determinaremos si están o no presentes en cada uno de los casos. Veamos cada uno de los casos:

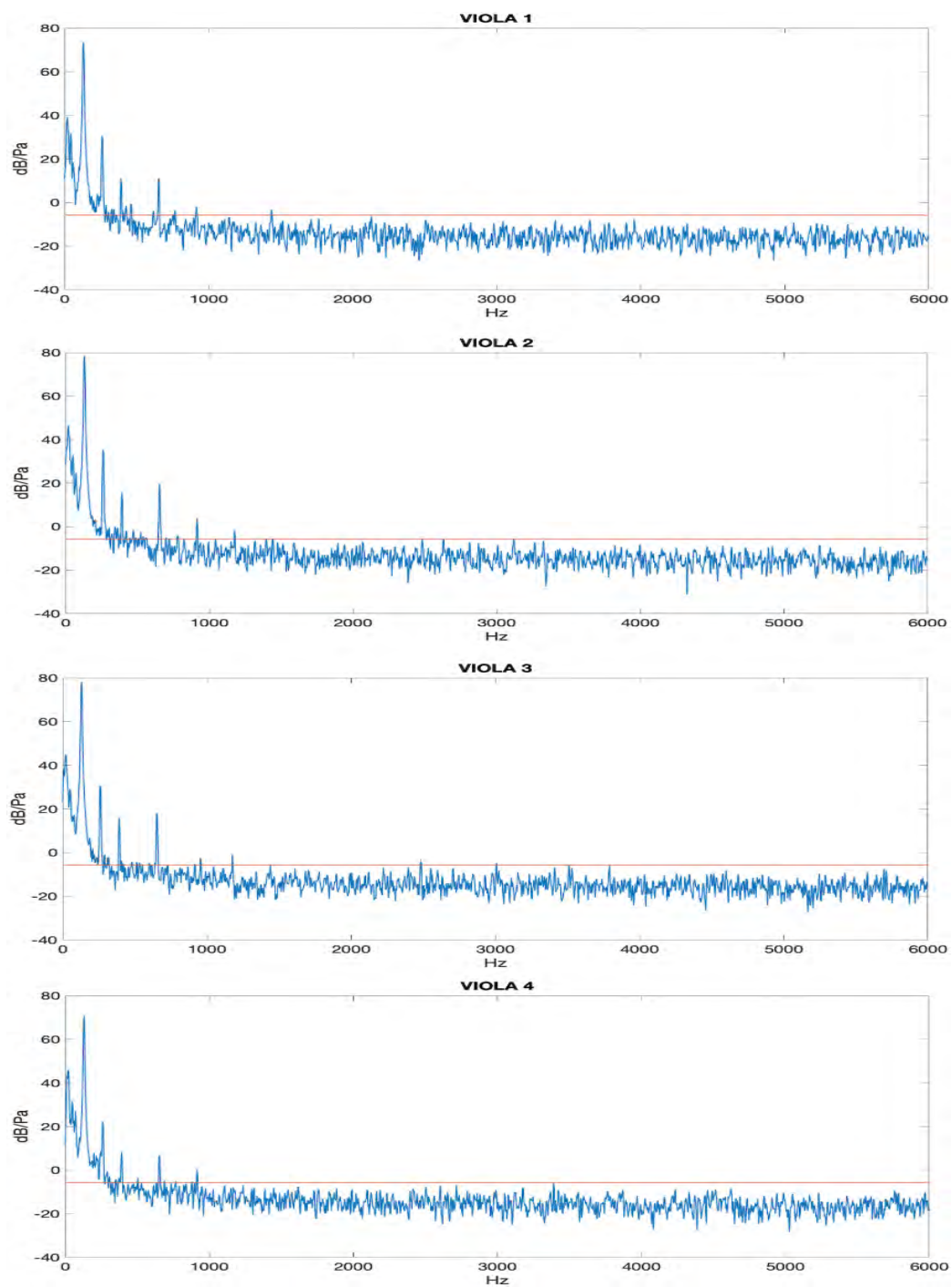


Figura 28: Espectros obtenidos en la emisión de DO para las diferentes violas

Podemos observar que en cada uno de los casos, diferentes armónicos resaltan por encima del umbral, y no siempre son compartidos por los diferentes instrumentos. Esto es precisamente lo que determina el timbre de cada instrumento, la cantidad de armónicos presentes y la potencia relativa de ellos. En la siguiente tabla podemos observar cuáles específicamente están presentes en cada instrumento. Por ejemplo, podemos notar que en el caso de la viola 1, los armónicos llegan más lejos que en cualquier otro instrumento, siendo junto con la viola 2 el instrumento que más armónicos tiene. Las otras violas, con un armónico (además de los introducidos por el altavoz, los cuales no podemos asegurar que estuvieran presentes) tienen una respuesta más pobre en armónicos de Do. Merece la pena destacar que en ninguno de los instrumentos está presente el tercer armónico, a la frecuencia de 523,252 Hz, así como tampoco el noveno, a la frecuencia de 1308,130 Hz. Encontramos también que en la viola 1 aparecen dos armónicos que no se encuentran en ninguna de las demás, el quinto y el décimo. Sucede lo mismo con la viola 2 en el séptimo armónico.

Armónicos de Do (Hz)	Viola 1	Viola 2	Viola 3	Viola 4
130,813	Sí	Sí	Sí	Sí
261,626	Sí	Sí	Sí	Sí
392,439	Sí	Sí	Sí	Sí
523,252				
654,065	Sí	Sí	Sí	Sí
784,878	Sí			
915,691	Sí	Sí		Sí
1046,504		Sí		
1177,317		Sí	Sí	
1308,130				
1438,943	Sí			

Cuadro 1: Inventario de armónicos de Do para la intercomparación de timbres

Según lo observado, podemos concluir que la viola 1, al tener mayor densidad de armónicos (aparecen 5 de los 6 primeros armónicos, lo que no sucede en ninguna otra viola, si bien es cierto que tenemos la incertidumbre del altavoz) tiene una mejor respuesta en baja frecuencia, y por tanto, una mayor resonancia al sonar la cuerda de Do.

7.3.2. Cuerda de Sol

Procedemos de la misma manera que hemos hecho con la cuerda de Do. Lo primero es representar la respuesta del altavoz ante la emisión del tono puro en la nota Sol2 (G3) a la frecuencia de 195,998 Hz. Obtenemos lo siguiente:

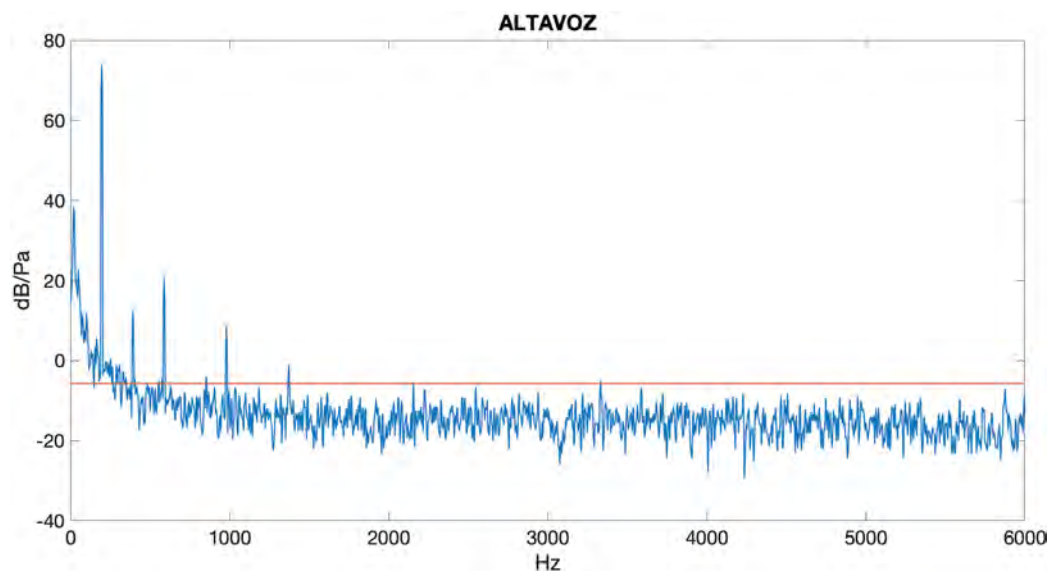


Figura 29: Espectro obtenido en la emisión de SOL solamente con el altavoz

En este caso, el altavoz introduce cuatro armónicos, el primero, el segundo, el cuarto y el sexto, lo cual deberá ser tenido en cuenta para el análisis de las respuestas en frecuencia de cada uno de los cuatro instrumentos. Las gráficas obtenidas en cada caso son las siguientes:

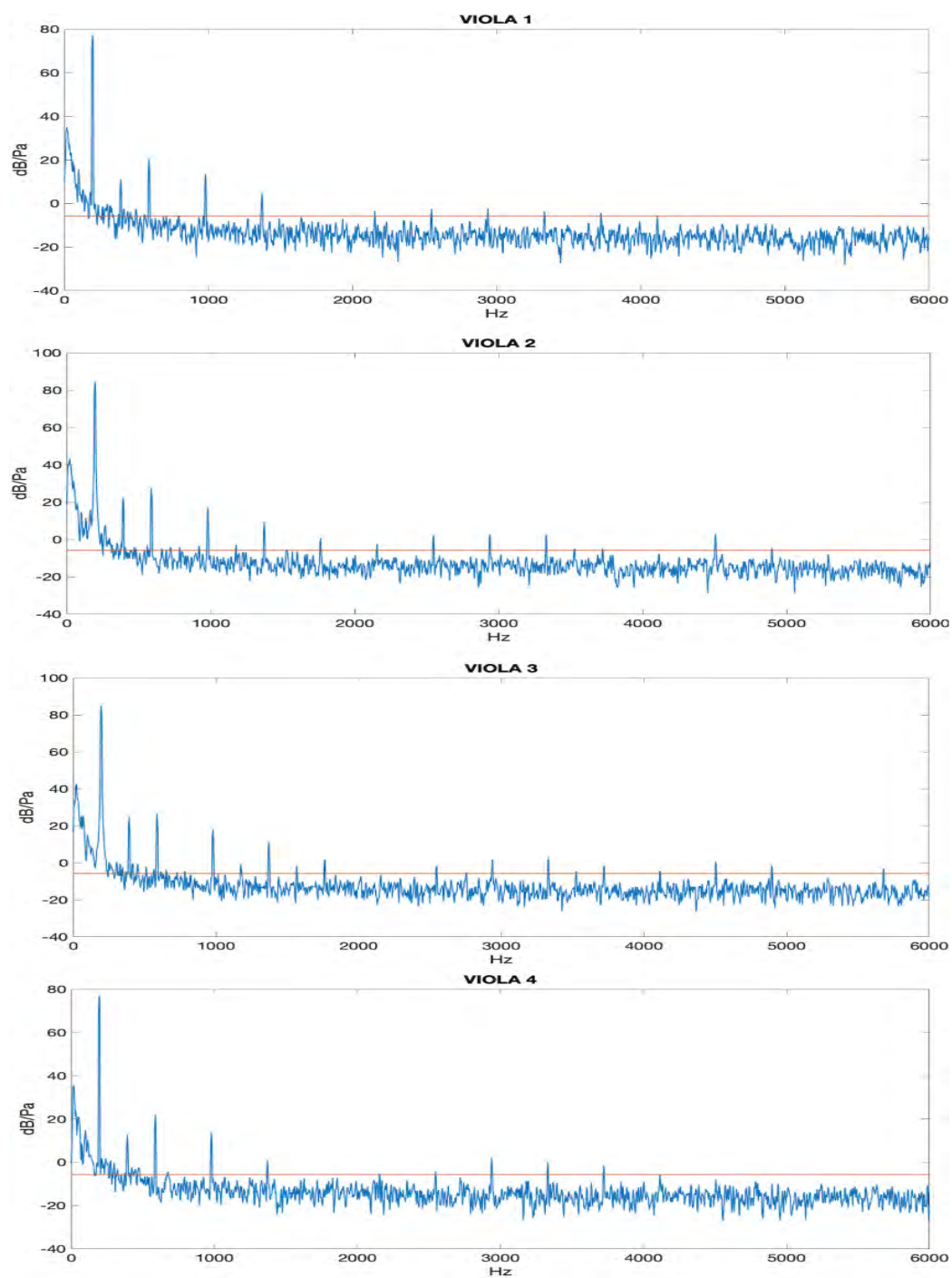


Figura 30: Espectros obtenidos en la emisión de SOL para las diferentes violas

En el caso de la cuerda de Sol observamos una clara tendencia en la aparición de los armónicos pares, así como la desaparición de los armónicos impares a medida que aumenta la frecuencia. Podemos observar de nuevo que el tercer armónico de Sol, correspondiente a la frecuencia de 783,992 Hz no aparece en ninguno de los cuatro instrumentos. También podemos notar que en las tres primeras violas el instrumento penaliza alguno de los armónicos pares que se esperaba que aparecieran, pero destaca el hecho de que en la viola 4 resulte una especie de .agujero”, donde no están presentes tres armónicos pares consecutivos, concretamente los armónicos octavo, décimo y duodécimo. Es extraño ya que observamos que los siguientes tres armónicos pares sí aparecen.

Armónicos de SOL (Hz)	Viola 1	Viola 2	Viola 3	Viola 4
195,998	Sí	Sí	Sí	Sí
391,996	Sí	Sí	Sí	Sí
587,994	Sí	Sí	Sí	Sí
783,992				
979,990	Sí	Sí	Sí	Sí
1175,988		Sí	Sí	
1371,986	Sí	Sí	Sí	Sí
1567,984			Sí	
1763,982		Sí	Sí	
1959,980				
2155,978	Sí	Sí		
2351,976				
2547,974	Sí	Sí	Sí	
2743,972				
2939,970	Sí	Sí	Sí	Sí
3135,968				
3331,966	Sí	Sí	Sí	Sí
3527,964				
3723,962			Sí	Sí

Cuadro 2: Inventario de armónicos de Sol para la intercomparación de timbres

En este caso, la viola que mejor respuesta tiene ante la excitación del Sol2 (G3) a la frecuencia de 195,998 Hz es claramente la número 3, con una gran

densidad de armónicos, puesto que aparecen 8 de los 9 primeros (nuevamente despreciando la influencia del altavoz, ya que algunos de estos armónicos podrían ser causados por el altavoz y no estar presentes en el instrumento; comparamos igualmente lo que observamos). Además, aparecen hasta frecuencias muy posteriores a la fundamental (aunque no están representados en la tabla, también se detectan armónicos adicionales a las frecuencias de 4.507,954 Hz y 4.899,950 Hz respectivamente que no están presentes en los otros instrumentos). Es este, por tanto, un instrumento muy rico al ejecutarse tal frecuencia.

7.3.3. Cuerda de Re

Una vez más, partimos de la respuesta del altavoz ante la emisión de un tono puro de la nota Re3 (D4) a la frecuencia de 293,665 Hz, obteniendo lo siguiente:

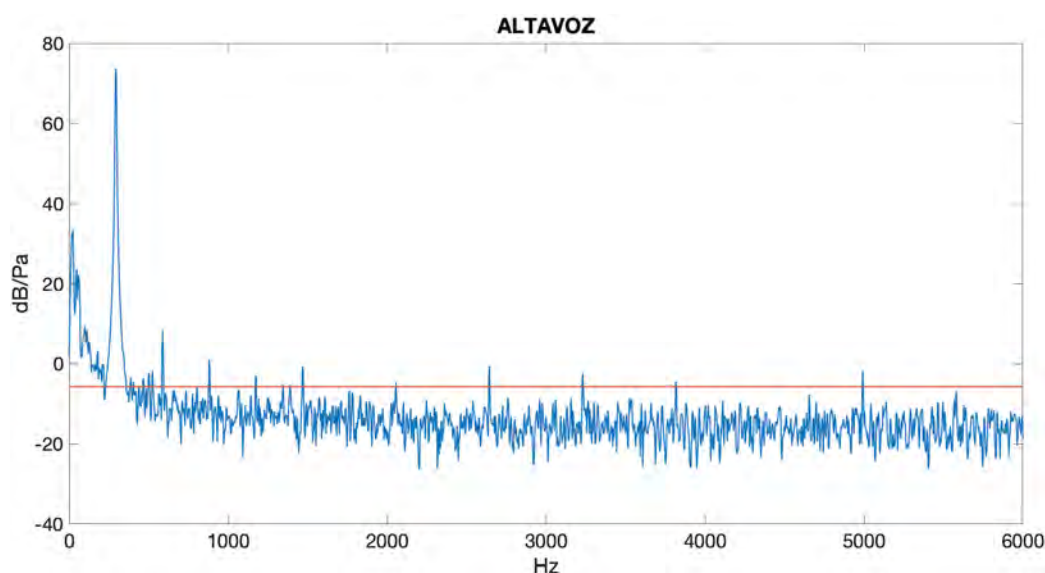


Figura 31: Espectro obtenido en la emisión de RE solamente con el altavoz

Tenemos en este caso un grave problema. En los dos casos anteriores, la respuesta del altavoz era mala, pero introducía solamente tres armónicos adicionales, primero, segundo y cuarto. En este caso, aparecen hasta nueve armónicos, aunque muchos de ellos con una potencia muy similar a la del

umbral que hemos utilizado para separar los armónicos del resto de la señal. La incertidumbre en este caso será mayor que en cualquier otro. Lo que sí podemos hacer es poner el foco en aquellos armónicos cuya potencia es considerablemente superior a la de aquellos que introduce el altavoz, lo cual es una evidencia de que en el instrumento resuenan aún más. Los espectros son los siguientes:

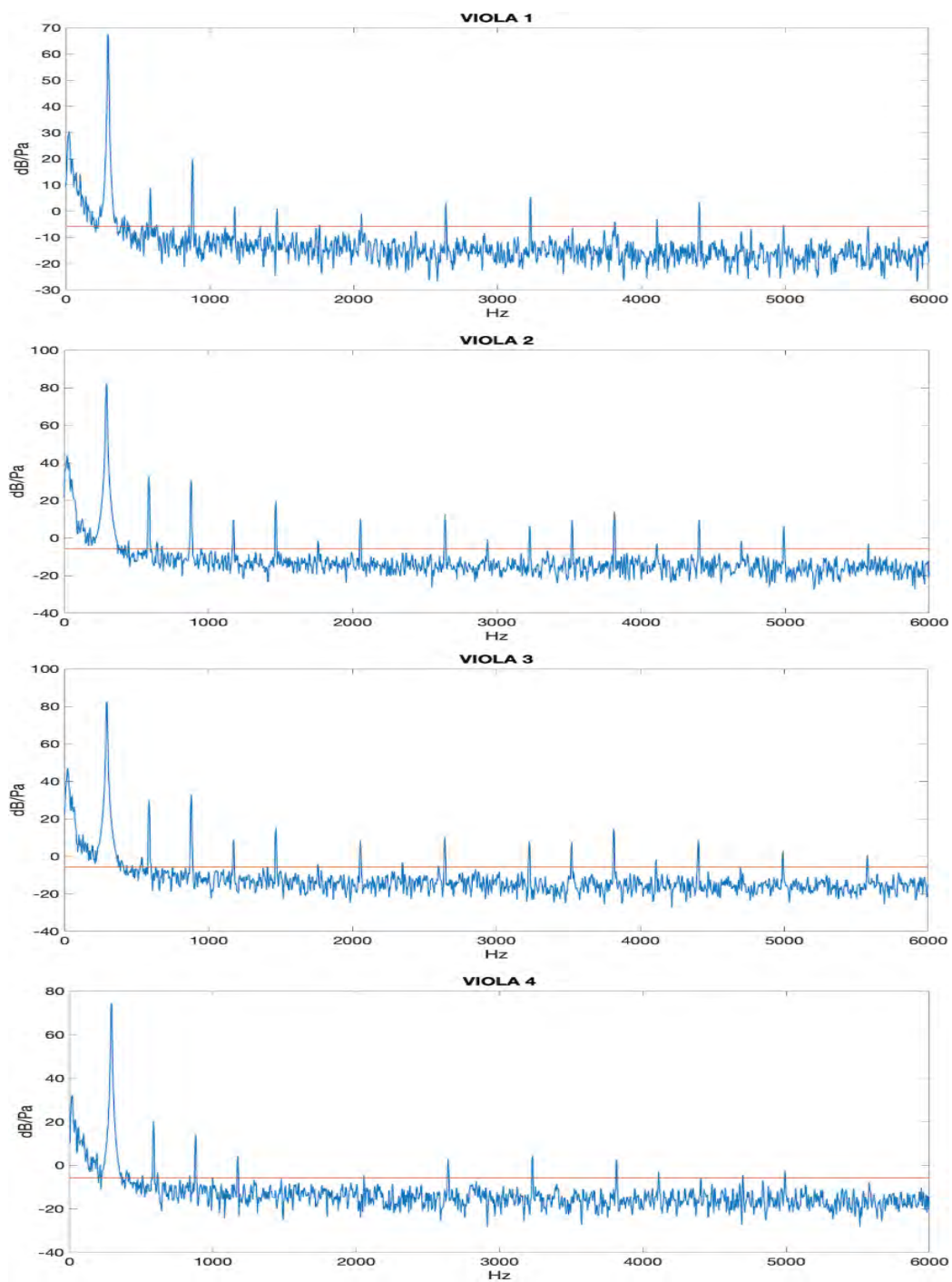


Figura 32: Espectros obtenidos en la emisión de RE para las diferentes violas

Si bien es cierto que los resultados del altavoz abrían un ensayo que podía estar manchado con un gran nivel de incertidumbre, lo que observamos en las gráficas nos deja algo más tranquilos, ya que en todas las violas, muchos de los armónicos que aparecen destacan con una potencia considerablemente superior a los del altavoz, sobre todo los primeros, que son los que más nos interesan.

En este caso, a diferencia de los anteriores, sí aparece el tercer armónico, y en todos los instrumentos. Además, para las tres primeras violas, los cuatro primeros armónicos están presentes con una potencia notable, lo cual ya nos indica que esta nota resuena con riqueza en general en la viola. La tendencia de que aparezcan los armónicos pares se mantiene, es más, por lo general, si falta alguno de ellos se suele encontrar en una posición par. No obstante, en este caso aparecen muchos armónicos impares, sobre todo en las violas 2 y 3. En la viola aparece el decimotercer armónico (aparte del primero y el tercero, antes mencionados). El caso curioso es el de la viola 4. Vuelve a aparecer un rango de frecuencias en que desaparecen armónicos (faltando, por ejemplo, el cuarto y el sexto, pares que sí aparecen en el resto de instrumentos). Además, desaparece algún armónico par en pos de la aparición de uno impar (aparece el decimotercero, pero no el decimocuarto, también presente en el resto de violas). Podemos pensar que en este registro tendrá un timbre más claramente diferenciable, por el hecho de tener características anómalas en comparación con los otros tres.

Armónicos de RE (Hz)	Viola 1	Viola 2	Viola 3	Viola 4
293,665	Sí	Sí	Sí	Sí
587,330	Sí	Sí	Sí	Sí
880,995	Sí	Sí	Sí	Sí
1174,660	Sí	Sí	Sí	Sí
1468,325	Sí	Sí	Sí	
1761,990		Sí		
2055,655	Sí	Sí	Sí	
2349,320			Sí	
2642,985	Sí	Sí	Sí	Sí
2936,650		Sí		
3230,315	Sí	Sí	Sí	Sí
3523,980		Sí	Sí	
3817,645	Sí	Sí	Sí	Sí
4111,310	Sí	Sí	Sí	Sí
4404,975	Sí	Sí	Sí	
4698,640		Sí	Sí	
4992,305		Sí	Sí	Sí
5285,970				
5579,635		Sí	Sí	

Cuadro 3: Inventario de armónicos de Re para la intercomparación de timbres

Tanto en el caso de la viola 2 como la viola 3, siete de los ocho primeros armónicos aparecen claramente, si bien es cierto que la viola 2 tiene un armónico más. La diferencia en este caso es más fina, y podemos concluir que ambas violas tienen una gran respuesta ante el Re, destacando por encima de las otras dos, con las claras diferencias tímbricas especificadas por los armónicos en que difieren y sus potencias relativas.

7.3.4. Cuerda de La

Pasamos así al análisis de la respuesta del La3 (A4) a una frecuencia de 440 Hz. Valga recordar lo que ya mencionamos en capítulos anteriores. Hemos optado por seleccionar esta frecuencia de afinación para el La, aunque también se utilice en gran medida una frecuencia de 442 Hz. Representamos la respuesta del altavoz ante la emisión de dicha nota:

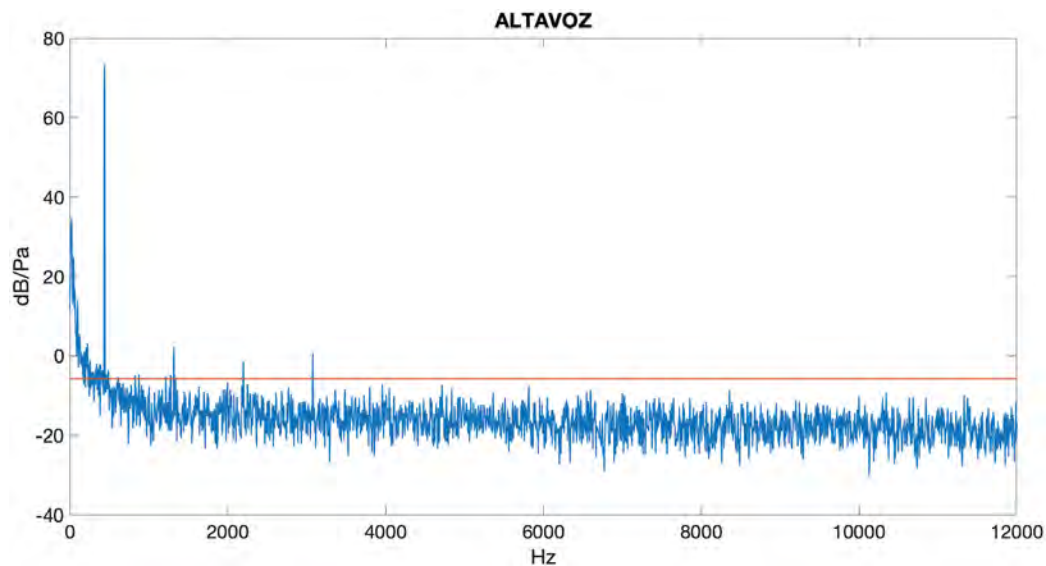


Figura 33: Espectro obtenido en la emisión de LA solamente con el altavoz

Lo primero que salta a la vista es el rango de frecuencias que hemos utilizado en este caso para visualizar la respuesta del altavoz (cosa que haremos de igual modo con las gráficas de cada instrumento). Ahora las gráficas alcanzan los 12000 Hz, porque como veremos, los armónicos en las violas alcanzarán frecuencias de ese orden. La respuesta del altavoz es mejor que en los casos anteriores, poniéndose a la par que en la emisión del Do, con solamente tres armónicos adicionales. En este caso, son el segundo, el cuarto y el sexto, a las frecuencias de 1320 Hz, 2200 Hz y 3080 Hz respectivamente, curiosamente, todos ellos pares. Pasamos entonces a visualizar y analizar lo que ocurre en cada una de las violas:

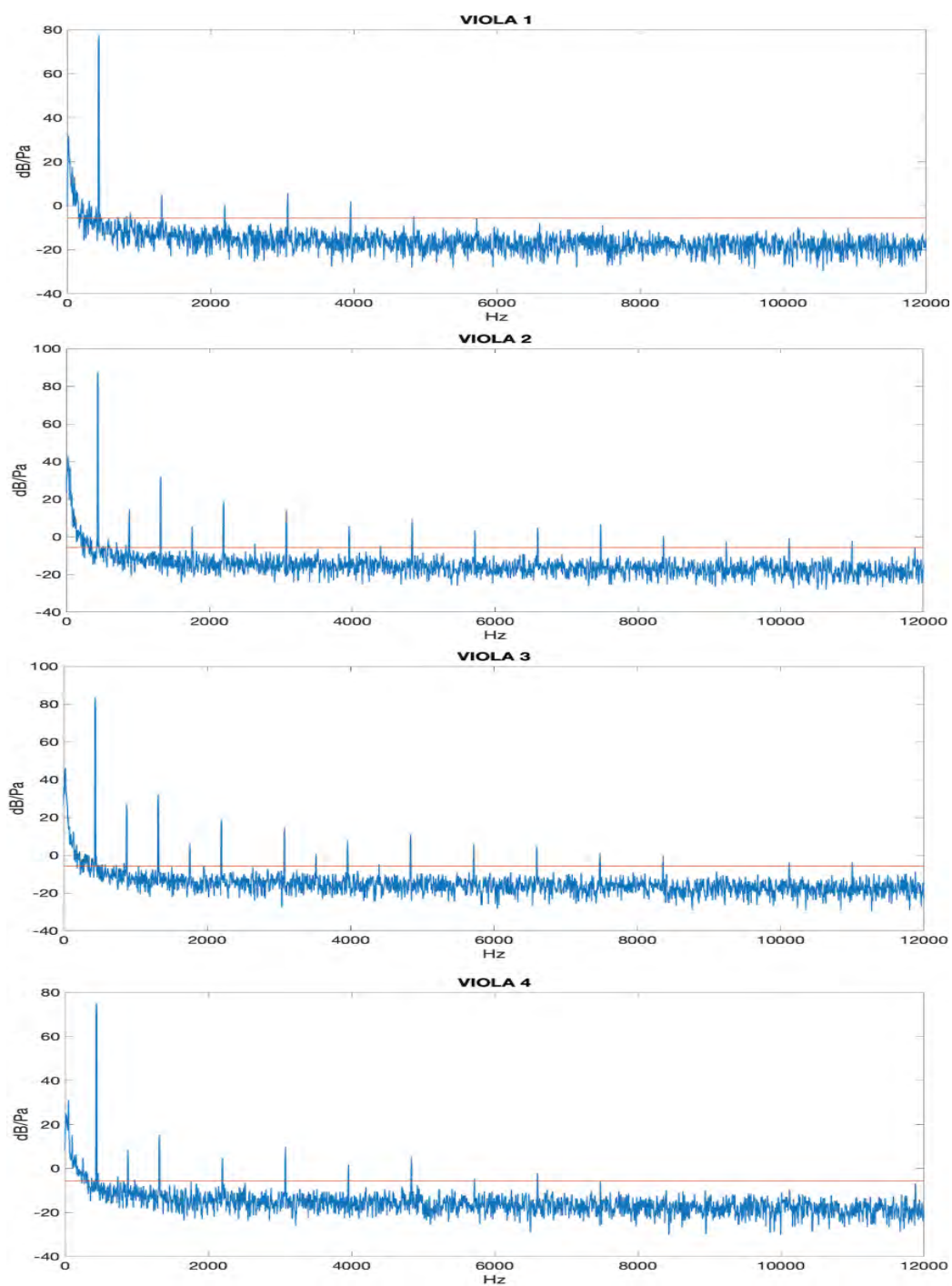


Figura 34: Espectros obtenidos en la emisión de LA para las diferentes violas

A tenor de los resultados obtenidos podemos extraer interesantes conclusiones. Vuelven a estar presentes los cuatro primeros armónicos excepto en el caso de la viola 1, en la cual, desaparece el tercer armónico, como sucedía para el Sol y para el Do. Se sigue apreciando una clara tendencia a la aparición de armónicos pares en todos los instrumentos, quizá de manera más evidente que en caso del resto de notas. No aparecen agujeros de armónicos en ninguna viola, como sí sucedía en el caso de la viola 4 anteriormente, pero sí se aprecia un silencio de armónicos muy temprano para el caso de la viola 1 (lo que indica una respuesta algo pobre en estas frecuencias más altas) y algo menor en la viola 4. Por contraposición, las violas 2 y 3 continúan aportando un gran número de armónicos, con una gran densidad en los ocho primeros, presentándose hasta siete de ellos. Más aún, ambas alcanzan hasta el vigésimo cuarto armónico. Esto nos muestra una excelente respuesta del instrumento y gran coloración a esta nota.

Armónicos de La (Hz)	Viola1	Viola 2	Viola 3	Viola 4
440	Sí	Sí	Sí	Sí
880	Sí	Sí	Sí	Sí
1320	Sí	Sí	Sí	Sí
1760		Sí	Sí	Sí
2200	Sí	Sí	Sí	Sí
2640		Sí		
3080	Sí	Sí	Sí	Sí
3520			Sí	
3960	Sí	Sí	Sí	Sí
4400				
4840	Sí	Sí	Sí	Sí
5280				
5720	Sí	Sí	Sí	Sí
6160				
6600		Sí	Sí	Sí
7040				
7480		Sí	Sí	Sí
7920				
8360		Sí	Sí	
8800				
9240		Sí		
9680				
10120		Sí	Sí	
10560				
11000		Sí	Sí	

Cuadro 4: Inventario de armónicos de La para la intercomparación de timbres

Claramente, la respuesta de las violas 2 y 3 destaca por encima del resto, aportando un gran número de armónicos y una respuesta en frecuencia densa y consistente. Las diferencias de calidad son más finas y van de la mano de una diversidad tímbrica que se ajusta más al gusto del propio músico, debido a los armónicos impares que se presentan y aportan un color distinto al sonido de cada uno de ellos.

7.3.5. Conclusiones del ensayo

A la luz de lo que hemos ido viendo, podemos establecer una serie de conclusiones globales sobre cada uno de los instrumentos y sus diferencias con el resto.

- Viola 1: Posee un gran número de armónicos ante la cuerda de Do con una gran densidad, lo que nos da una muestra de que su respuesta en baja frecuencia es la mejor de todas. También, en el caso de la cuerda de Sol, podemos encontrar un buen número de armónicos. La respuesta ante el Re es bastante uniforme aunque algo más pobre, y a medida que aumenta la frecuencia el número de armónicos va disminuyendo poco a poco hasta llegar a tener una respuesta algo pobre ante la nota La. No hemos hallado para esta viola el tono del lobo.
- Viola 2: Posee una respuesta sorprendentemente buena en todo el rango de frecuencias. Es probablemente la más regular de todas por tener buena respuesta a todas las notas. El único inconveniente es el tamaño, puesto que es el instrumento más pequeño. Esto se nota en la cantidad de sonido que es capaz de generar, menor a la del resto de instrumentos. Este factor, unido a que el tamaño es inferior al mínimo establecido para la viola (38 cm) es lo único que podría explicar que la tasación de esta viola sea la del menor precio. Con todo, es la que mayor número de armónicos posee en general ofreciendo una rica coloración de sonido. Debe ser destacado entonces que es una viola construida por *luthier* y no mediante un método más industrializado, lo que le aporta un claro valor añadido, que se puede observar en el análisis espectral. No hemos hallado para esta viola el tono del lobo.
- Viola 3: A excepción de la cuerda de Do, cuya respuesta penaliza algún armónico, tiene un comportamiento excelente en el resto de frecuencias, aportando un gran número y densidad de armónicos. Tiene la mejor respuesta de todas ante la cuerda de Sol y genera una señal bastante uniforme. No tiene el inconveniente del tamaño que tenía la viola 2, y genera un volumen superior al resto de instrumentos. No hemos hallado para esta viola el tono del lobo. Se presenta así como el mejor instrumento de todos.
- Viola 4: Tiene buena respuesta sobre todo en alta frecuencia, especialmente ante el La. No obstante, a medida que disminuimos la frecuencia

aparecen grupos de armónicos que vienen penalizados, generando pequeñas lagunas en el diagrama de espectros. Hemos visto cómo en las cuerdas de Sol y Re desaparecen armónicos consecutivos que están presentes en los demás instrumentos, lo cual hace notar que los armónicos quedan más dispersos y menor uniformemente distribuidos. No hemos hallado para esta viola el tono del lobo.

Algunos de los problemas que hemos visto podrían deberse a errores de construcción, desvíos accidentales de la posición del alma o imperfecciones en el desarrollo de algunos elementos. Aun así y con todo, siguiendo este análisis, podemos concluir que la mejor de las violas que hemos llevado a ensayo es la viola 3, seguida por la viola 2, la viola 1 y en último lugar, la viola 4.

8. Estudio de la influencia del puente

En este capítulo profundizaremos un poco más acerca de la importancia del puente en los instrumentos de cuerda frotada, y en particular, en la viola. Hemos visto cómo el puente es una pieza fundamental, responsable de drenar la energía almacenada en las cuerdas hacia el cuerpo del instrumento, a fin de transmitir las vibraciones a la caja armónica, así como al aire contenido en ella. Estudiaremos su forma y su composición, el por qué ha llegado a convertirse en lo que es ahora, la función principal en el conjunto del instrumento, y otros aspectos. Por último, realizaremos una serie de ensayos para tratar de valorar numéricamente cómo afecta al sonido que no esté correctamente construido, o las consecuencias de que su localización en el cuerpo del instrumento no sea la idónea.

8.1. Estructura y función

El puente es una pequeña pieza de madera, generalmente de arce (maple), que se apoya sobre la tapa superior del instrumento y soporta sobre sí la tensión de las cuerdas.



Figura 35: Forma actual y más común del puente de la viola [27]

El rol principal del puente consiste en transformar el movimiento de la vibración de las cuerdas en fuerzas periódicas aplicadas a la tapa superior por medio de sus dos pies. Tiene una forma muy característica, fruto de la

evolución y la investigación por parte de los *luthier*, que a lo largo de múltiples generaciones han descubierto que dicha forma concreta es una manera efectiva de alterar la curva de la respuesta del instrumento. Parece una especie de luchador de sumo en cuclillas, en posición agazapada, apoyado sobre dos pies y con un corte en forma de corazón en medio del cuerpo. Savart³³, en 1840 lo describe así:

”Si tomamos una pieza de madera tallada como un puente y la pegamos a un violín, el instrumento no tendrá apenas sonido; comienza a mejorar si formamos unos pies en el puente; si además introducimos dos pequeñas ranuras laterales, la calidad del sonido comienza a incrementar hasta que tallamos el puente completo hasta adquirir la forma usual. Es sorprendente cómo hemos llegado a desarrollar la forma actualmente utilizada, que parece ser la mejor de todas las que podrían haber sido adoptadas.”[28]



Figura 36: Diversas formas que ha ido adquiriendo el puente, y que aún fabrica Milo Stamm Ponticelli Hamburg para violines y violas modernos y barrocos[27]

El puente es una pieza única para cada instrumento, y es susceptible ser reemplazada y ajustada con relativa frecuencia. Los pies del puente se sitúan sobre la tapa superior del instrumento, y el apoyo de estos debe ser lo más perfecto y regular posible. El ajuste, como hemos indicado, debe hacerse para cada tapa, de manera que la curvatura de la base de los pies tenga exactamente la forma de la caja en la posición donde va a colocarse, tratando

³³Félix Savart, físico, médico y profesor francés que incluso llegó a idear un violín de forma trapezoidal.

además de que, ni en la tapa ni en el puente, existan imperfecciones. Lo ideal es que se unan como si de una sola pieza se tratase, que toda la superficie de la planta de los pies esté en contacto con el cuerpo del instrumento, y que se encuentre en posición perpendicular a este. Con ello se consigue una transmisión óptima de las vibraciones de las cuerdas al cuerpo del instrumento. La localización concreta del puente en la tapa superior puede además aportar un color de sonido determinado y distinto.

Además, el músico puede sugerir modificaciones en la altura o la posición, ya que, como veremos, estos factores tienen una gran influencia en el sonido y en el timbre del instrumento. No obstante, estas modificaciones tienen sus ciertas limitaciones, y han de ser realizadas por un *luthier* experto. Si el músico sugiere un puente de menor altura, el *luthier* puede limar la parte superior de este, reduciendo la distancia entre las cuerdas y el diapasón. Esto permite que la presión sobre la cuerda que debe ejercer el músico para realizar la digitación sea menor, y puede conllevar a la prevención de lesiones o a la relajación en la técnica de la mano izquierda. Tiene, no obstante, el riesgo de que pueda producirse algo de distorsión al tocar en dinámica de *forte* o *fortissimo*, puesto que la amplitud de la onda generada en la cuerda es mayor y podría llegar golpear el diapasón, dando lugar a un sonido percusivo algo desagradable. Alterar la posición relativa puede contribuir a reforzar el registro de graves o agudos, y por tanto alterar en cierto modo el timbre y el color del sonido producido, encontrando configuraciones distintas de alma y puente. En este caso, el riesgo está, por ejemplo, en la posibilidad de aumentar la susceptibilidad de la aparición del tono del lobo, como veremos en los experimentos posteriores.

El puente, teóricamente, se sitúa en la línea imaginaria que une los travesaños de las *f*. No obstante, puede situarse en una posición superior o inferior, lo cual, como hemos visto tiene sus riesgos. Ahora bien, esa posición teórica del puente tiene su sentido acústico, y es el siguiente. Mirando la viola de frente, con la voluta apuntando hacia arriba, tenemos el pie derecho e izquierdo del puente. El pie derecho se coloca en una posición muy cercana (o incluso encima) al punto de contacto con el alma. Se sitúa en ese punto porque el conjunto sirve de refuerzo acústico en altas frecuencias. Por otro lado, el pie izquierdo del puente se sitúa sobre la barra armónica, que ya vimos que sirve de refuerzo acústico en bajas frecuencias.



Figura 37: En algunas violas, la línea guía para la colocación del puente se encuentra trazada, como la de la imagen

Según experimentos realizados por Minnaert y Vlam en 1937, que a su vez confirmaron las observaciones de Raman y otros, el puente posee un gran número de modos vibratorios, identificándose de manera separada modos longitudinales, torsionales y transversales [29]. Bladier realizó una serie de experimentos acerca de la respuesta en frecuencia del puente del violoncello, concluyendo que el puente actúa como una especie de amplificador acústico con una ganancia en amplitud de aproximadamente 2 (6 dB) entre 66 y 660 Hz, pasando a tener una ganancia de 1 más allá de esa frecuencia [30]. Steinkopf modeló el puente del cello como un dispositivo de tres puertas, una de entrada (la vibración de las cuerdas) y dos de salida (los pies) [31].

La proporción de transferencia de las vibraciones de un medio a otro depende de la magnitud relativa de dos medios. La impedancia acústica puede definirse como la relación entre fuerza conductora y velocidad. Puede entenderse así como la resistencia que ofrece el cuerpo a la onda o una vibración

en una frecuencia conducida por una cuerda frotada.

$$Z = \frac{F}{v} \quad (5)$$

La impedancia acústica (Z) queda por tanto caracterizada de esta manera, directamente proporcional a la fuerza conductora (F) e inversamente proporcional a la velocidad (v).

La calidad del tono en un instrumento de arco viene determinada en gran medida por la capacidad del puente de transferir energía de las cuerdas al cuerpo del instrumento a través de sus dos pies. Esta transferencia depende de la impedancia del puente en oposición a la fuerza imprimida por las cuerdas. Reinecke³⁴ publicó en la Sociedad Acústica de Catgut un artículo de gran importancia, y que es referencia en muchísimos escritos. Señala que en términos de telecomunicaciones, el instrumento puede ser tratado como un "multipuerto", basándose en los estudios de Steinkopf, pero en este caso, modelándolo como una caja negra con dos entradas y dos salidas, cada una de ellas con sus impedancias de entrada. Midió la impedancia de entrada y las funciones de transferencia de la fuerza de las cuerdas sobre los dos pies de diferentes puentes, observando resonancias entre 1 kHz y 2 kHz en el puente de un violoncello y entre 3 kHz y 6 kHz. Estas resonancias incrementan notablemente los parciales de las cuerdas en esta región [32]. Además, Cremer analizó las resonancias del puente de un violín con el método de interferometría holográfica, observando que en el puente del violoncello se produce un movimiento de flexión en sus pies, mientras que en el del violín es más bien rotacional [24].

Hemos visto que los pies del puente se apoyan sobre la barra armónica y sobre el alma. Esto condiciona el movimiento concreto que puede describir el puente en funcionamiento. En el caso del pie derecho, está situado sobre el alma, que soporta una gran presión, y como vimos en el capítulo dedicado a los modos, conecta las tapas superior e inferior. Es un lugar donde la vibración efectiva no es muy grande, o lo que es lo mismo, no tiene gran libertad de movimiento. Por ello, la rotación (desplazamiento característico del puente de la viola, similar al del puente del violín) en el pie derecho es muy pequeña, y prácticamente sirve como eje de giro. El pie izquierdo, en cambio, se coloca

³⁴Walter Reinecke, ingeniero alemán del siglo XX, del *Institut für Technische Akustik* de la *Technische Universität Berlin*.

sobre la barra armónica. A diferencia del alma, esta pieza de madera no conecta las dos tapas, sino que recorre la superior longitudinalmente. Al no soportar tanta presión como en el caso anterior (y quedar en cierto modo "suspendido en el aire"), tiene mucha mayor libertad de movimiento, y la rotación recorrida en este caso es mucho mayor. A medida que la frecuencia aumenta, el desplazamiento que se produce en el puente no es tan rotacional sino longitudinal en dirección perpendicular al cuerpo del instrumento.

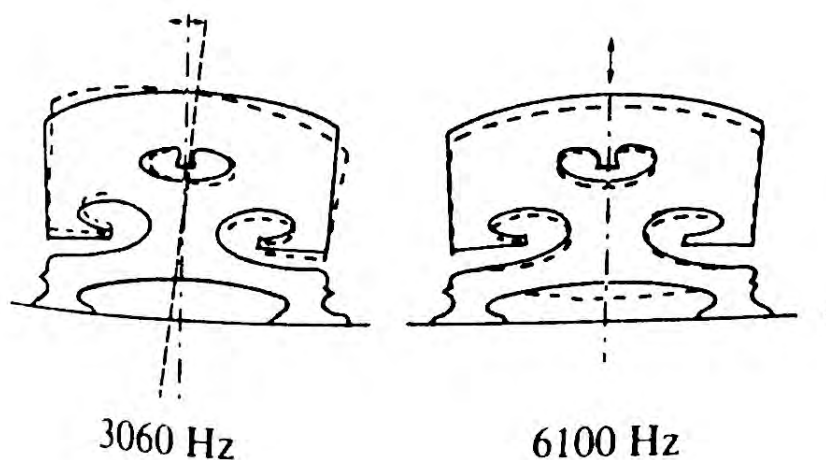


Figura 38: Movimiento rotacional o longitudinal del puente[12]

En comparación con el puente del violín, la forma y el comportamiento físico es muy similar, por no decir prácticamente el mismo. Los puentes se comercializan como una pieza base que luego el *luthier* ajusta a cada instrumento, y en los casos donde así se desee, atendiendo a las preferencias y gustos del músico. Los puentes del violoncello y del contrabajo, en cambio, tienen una forma distinta (podría pensarse que se fabricarían a escala de los puentes del violín, pero no es así, sino que han desarrollado su forma concreta). Como era de esperar, es mucho más grueso, pero la diferencia principal está en que las patas son mucho más altas. El movimiento que describen estos puentes es más bien lateral en frecuencias inferiores, y rotacional en frecuencias mayores, no teniendo un movimiento longitudinal en dirección perpendicular, como en el caso que nos ocupa.

8.2. Influencia de la posición

A continuación, realizaremos una serie de ensayos en los que trataremos de visualizar la influencia de la posición del puente en el timbre del instrumento. Aprovecharemos para ello la justificación teórica de los ensayos que realizamos en el capítulo anterior, puesto que recrearemos las mismas condiciones de ensayo, logrando la resonancia del instrumento con vibración por simpatía. Ya que fuimos capaces de caracterizar el timbre de varios instrumentos diferentes, en este caso visualizaremos la respuesta en frecuencia de un solo instrumento, pero al que modificaremos la posición del puente, para comprobar qué efecto tiene en el sonido, sus armónicos, qué consecuencias tiene.

En el primero de los casos, utilizaremos la que anteriormente conocimos como viola 2, cuyos detalles se especifican en el inventario de instrumentos al final del trabajo (Sección A). De entrada, era la viola elegida para realizar los experimentos con el puente, y es curioso que es esta la viola que a posteriori de los ensayos anteriores uno habría escogido, y explico el porqué. Tras haber concluido el análisis anterior hemos podido observar que la viola 2 tiene un gran número de armónicos en la respuesta en frecuencia en todas las cuerdas. Esto nos viene genial para identificar mejor cuáles son los armónicos que vendrán penalizados en cada uno de los casos, porque lo hace mucho más evidente.

En este primer escenario, el puente se encuentra inicialmente en la posición teórica, en la línea imaginaria que describen los travesaños de las f , situado de manera perpendicular al cuerpo del instrumento. Este ajuste venía realizado por un *luthier*, por lo que la curvatura de los pies es la idónea para esta parte específica de la tapa, y el ajuste con el alma era el más adecuado a criterio del constructor. La distancia entre la línea imaginaria teórica y el centro del alma es de apenas 6 mm. El pie izquierdo se encuentra perfectamente sobre la barra armónica. Como estas condiciones iniciales son las que estaban presentes en el ensayo del timbre, reutilizaremos todas las gráficas anteriores para el caso que ahora nos ocupa.

En el segundo caso, utilizaremos la misma viola 2, pero desplazaremos el puente a un punto superior, guardando cuidado de que los pies se mantengan en posición paralela a la línea imaginaria de la teórica. La distancia entre esta posición y la inicial es de unos 30 mm aproximadamente, haciendo que la distancia entre la línea imaginaria que une ambos pies y el centro del alma aumente hasta los 36 mm. Los pies se colocarán a la altura

de los extremos de las f , en los círculos superiores, cuidándose de que al ajustar la tensión de las cuerdas no se desplace a los lados (provocando que las cuerdas no estén centradas en el diapasón) y se mantenga perpendicular. En este caso, dado que hemos alejado el puente con respecto de la posición del alma, el punto de apoyo del pie derecho tiene mayor libertad de movimiento, provocando que los desplazamientos torsionales puedan tener un mayor recorrido. El pie izquierdo sigue estando sobre la barra armónica, dado que el desplazamiento ha sido en el eje vertical, coincidente con esta. Al situarse más arriba, la altura de las cuerdas con respecto del diapasón es mayor de lo habitual, lo que produce que la digitación sea mucho más difícil de llevar a cabo, teniendo que ejercer más presión con la mano izquierda, cansando más la musculatura. Esto no es cómodo para el músico, por lo que también sería lógico que, en caso de querer mantener el puente en esta localización (aunque no tiene mucho sentido práctico) se le pediría al *luthier* que limara el puente en su parte superior, lo cual alteraría en exceso la estructura y composición de la pieza, pudiendo penalizar y estropear sus propiedades vibratorias. Como es evidente, deberíamos añadir que el apoyo de los pies no es óptimo, ya que la curvatura de la tapa superior en este punto no es la misma que en la zona teórica de colocación del puente, por lo que este factor también va a influir en el sonido. Lo ideal sería construir y ajustar un puente para esa zona del cuerpo y comprobar su influencia, estrictamente debido a la posición, pero a efectos prácticos, vamos a despreciarlo.

En el tercer y último caso, utilizaremos de nuevo la viola 2, pero ahora llevaremos el puente a una posición inferior. Desplazaremos el puente unos 25 mm con respecto de la línea teórica, situando el puente a una altura aproximada de los círculos inferiores de las f . En este caso, el pie derecho dista del centro del alma una distancia de alrededor de 19 mm, menor que en el escenario anterior, pero superior al teórico y realizado por el *luthier*. La altura de las cuerdas es ahora ligeramente menor que en el caso original, lo cual permite una digitación más relajada y cómoda, pero aporta algún problema ulterior, como es el de que aparezca la posibilidad de que las cuerdas choquen con el diapasón cuando vibran con gran amplitud, causando distorsión. El apoyo de los pies tampoco es ahora, el idóneo, pero también será un efecto que despreciaremos (aunque las conclusiones que extraigamos en nuestro estudio no se deberán exclusivamente a la posición, sino también a ese factor).

Vistos los tres posibles escenarios que llevaremos a ensayo (que pueden verse claramente en el inventario, en la sección A, con fotografías de cada uno de los casos), pasaremos a analizar los resultados obtenidos. Pero antes

de ello, hemos de realizar una pequeña puntualización. Estos cambios estructurales que hemos llevado a cabo tienen el inconveniente fundamental del tiempo, no solamente a la hora de ajustar cuidadosamente los cambios, sino también en temas de afinación. Las cuerdas han sido destensadas y tensadas a la vez, provocando que el instrumento soporte tensiones muy diferentes en períodos cortos de tiempo (entre 30 y 60 minutos), lo cual hace que el instrumento se temple y destemple constantemente. En consecuencia, la afinación será mucho más inestable de lo habitual, por lo que deberá ser comprobada y corregida frecuentemente. Si esto no se realiza correctamente, la frecuencia de las cuerdas, que hemos dicho que es inestable, podría ser muy diferente a la del tono puro que emitimos con el altavoz. Y como vimos en su momento, la respuesta de la cuerda ante esta excitación externa no será la óptima, sino que irá siendo cada vez más débil a medida que esta diferencia frecuencial sea mayor. La afinación se ha revisado tantas veces como hemos considerado necesario para buscar la respuesta óptima de la cuerda ante la vibración por simpatía, y poder concluir que los efectos que visualicemos vendrán exclusivamente (o al menos en un porcentaje muy elevado) del escenario que hemos generado, y no de un mal control de las condiciones de ensayo.

8.2.1. Cuerda de Do

Lo primero que hacemos, como es habitual, es mostrar la respuesta del altavoz para saber cuáles de los armónicos podemos identificar como específicos del instrumento, en este caso, para la cuerda de DO:

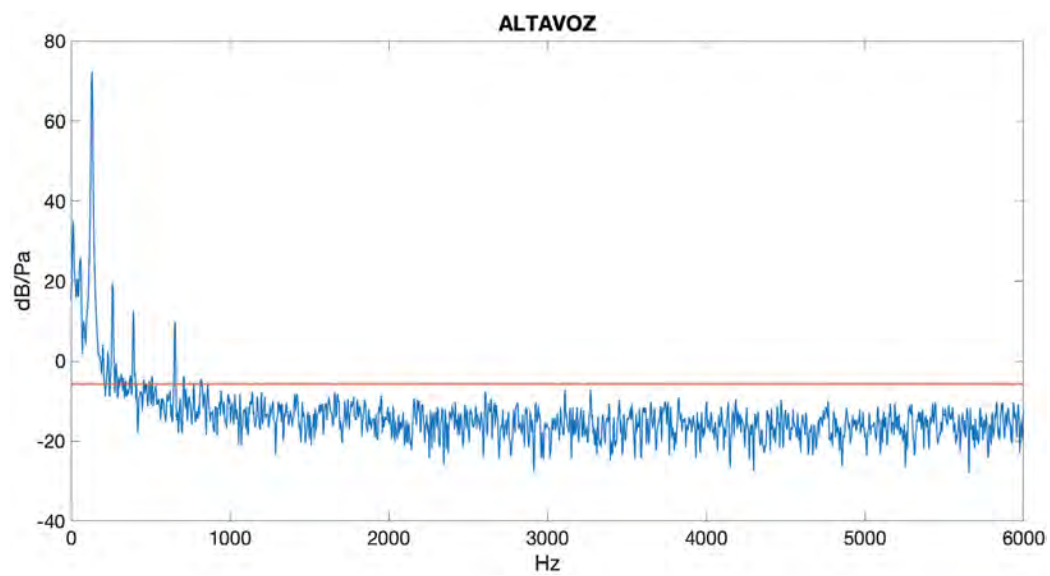


Figura 39: Espectro obtenido en la emisión de DO solamente con el altavoz

A continuación mostramos los resultados obtenidos para las tres condiciones propuestas

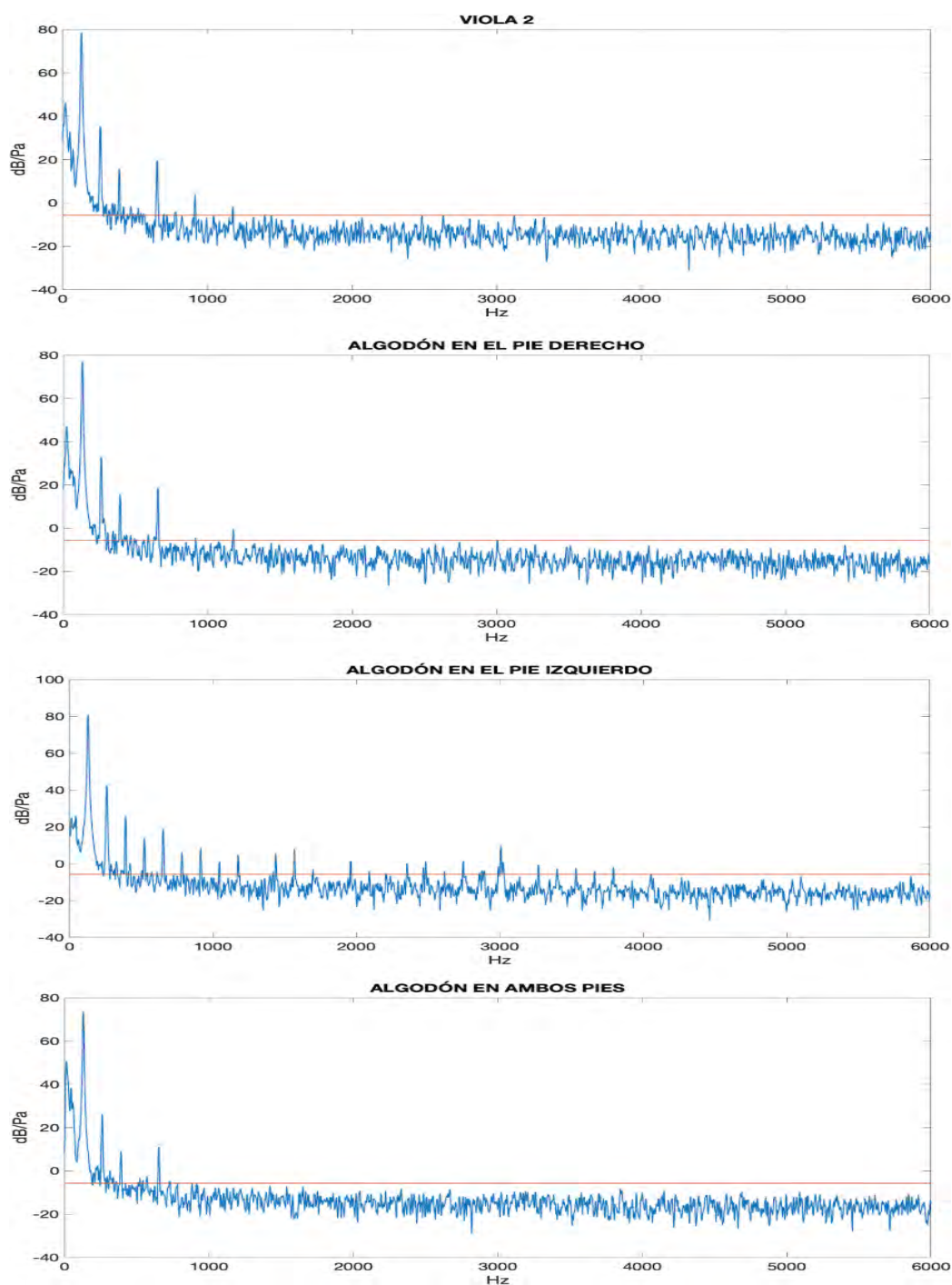


Figura 40: Espectros obtenidos en la emisión de DO para las diferentes posiciones

Es curioso lo que observamos en este caso. Si nos fijamos en la gráfica del puente más arriba de lo normal, notamos que aparecen los diez primeros armónicos sin excepción, lo cual escapa a la lógica. Aparece un sonido mucho más coloreado y más rico en armónicos con el puente colocado en una posición bastante alejada de la teórica, la que se ha considerado la óptima. Incluso, el apoyo de los pies es bastante imperfecto. Aun así, estos son los resultados. Solo se podría explicar que el puente no se coloque en esa posición (que aparentemente es mejor) si la respuesta en el resto de casos es mucho peor. Por otro lado, con el puente colocado mucho más abajo de la línea teórica, la respuesta es paupérrima, siendo prácticamente la gráfica del altavoz calcada. Este caso no deja lugar a dudas.

Armónicos de Do (Hz)	Viola 2	Puente Arriba	Puente abajo
130,813	Sí	Sí	Sí
261,626	Sí	Sí	Sí
392,439	Sí	Sí	Sí
523,252		Sí	Sí
654,065	Sí	Sí	Sí
784,878		Sí	
915,691	Sí	Sí	
1046,504	Sí	Sí	
1177,317	Sí	Sí	Sí
1308,130		Sí	
1438,943		Sí	

Cuadro 5: Inventario de armónicos de Do para el ensayo sobre la posición del puente

Tenemos, por tanto, dos caminos que se nos abren. Por un lado, el puente abajo nos empobrece trágicamente la respuesta en baja frecuencia del instrumento (aunque la tabla registre la existencia del tercer y el octavo armónicos, si nos fijamos en la gráfica, la potencia de estos prácticamente coincide con el umbral, lo que tampoco deben ser considerados fuertemente), mientras que, por otro lado, el puente en una posición superior a la teórica enriquece mucho este registro. Puede esto darnos un indicio de que, situando el puente en una posición ligeramente superior (no tan exagerada como la que hemos aplicado para este ensayo) podamos mejorar la respuesta del instrumento en baja

frecuencia. También puede darnos un indicio de que lo que está apareciendo es un cierto grado de distorsión. Veamos entonces qué sucede en el resto de notas.

8.2.2. Cuerda de Sol

La gráfica del altavoz al emitir esta nota muestra lo siguiente:

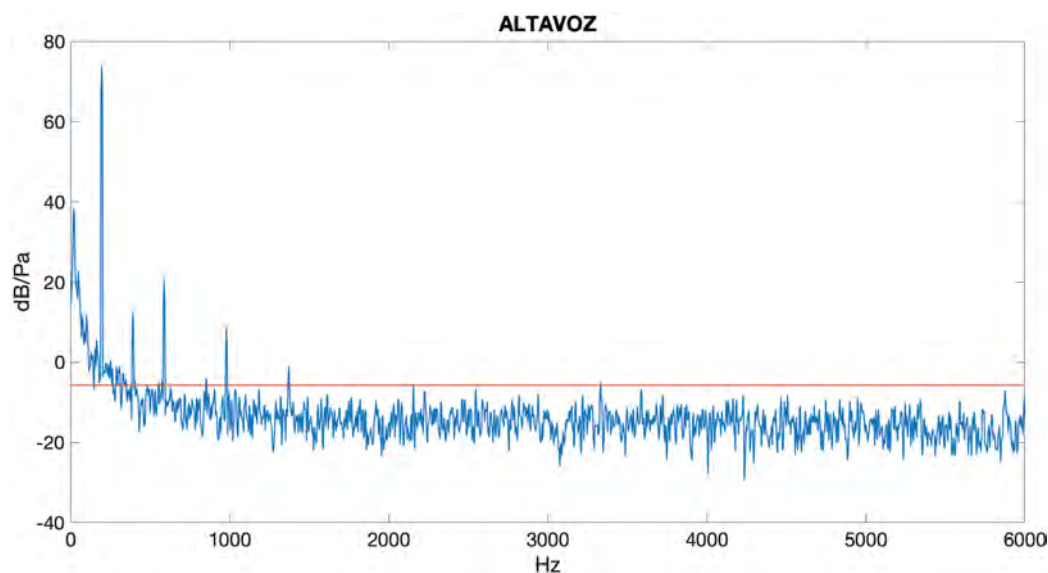


Figura 41: Espectro obtenido en la emisión de SOL solamente con el altavoz

En este caso, la respuesta del altavoz no era todavía terrible, aunque aparecen algunos de los primeros armónicos. Pasemos a ver, por tanto, las gráficas de lo obtenido en este caso:

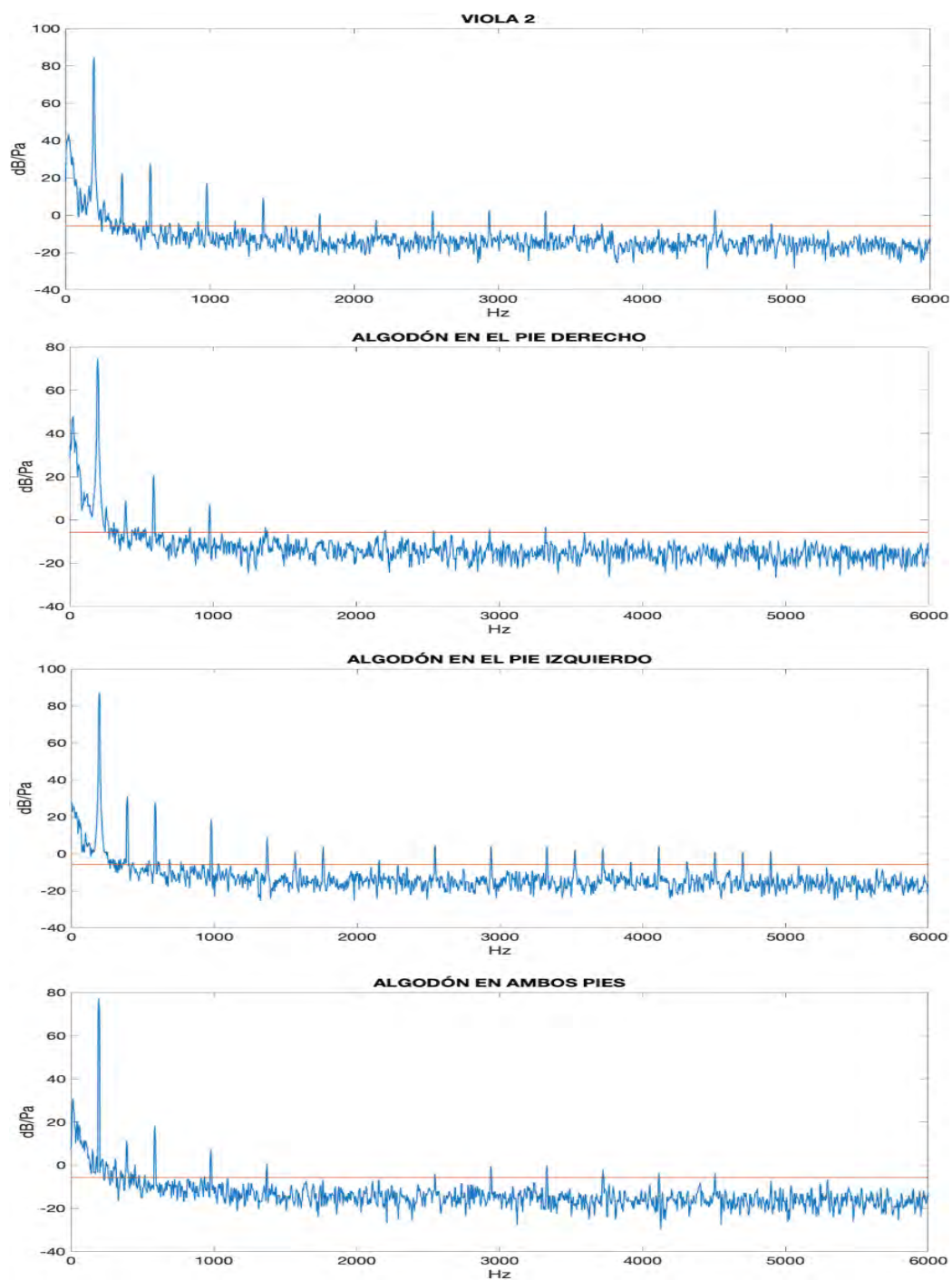


Figura 42: Espectros obtenidos en la emisión de SOL para las diferentes posiciones

Si nos fijamos ahora en el caso del puente arriba, los resultados muestran ahora una respuesta más similar a los del caso teórico, aunque observamos que cambia la coloración. El número de armónicos es similar a los de la viola 2 con el puente en su lugar original, pero los impares han cambiado de sitio. Antes aparecía el quinto armónico, que desaparece, pero ahora aparecen el tercer y séptimo armónicos, que originalmente no estaban. El timbre es por tanto notablemente distinto. El puente abajo sigue ofreciendo una respuesta más pobre, haciendo desaparecer algunos de los armónicos que en un primer momento estaban presentes.

Armónicos de SOL (Hz)	Viola 2	Puente arriba	Puente abajo
195,998	Sí	Sí	Sí
391,996	Sí	Sí	Sí
587,994	Sí	Sí	Sí
783,992		Sí	
979,990	Sí	Sí	Sí
1175,988	Sí		
1371,986	Sí	Sí	Sí
1567,984		Sí	
1763,982	Sí	Sí	
1959,980			
2155,978	Sí	Sí	Sí
2351,976			
2547,974	Sí	Sí	Sí
2743,972			
2939,970	Sí	Sí	Sí
3135,968			
3331,966	Sí	Sí	Sí
3527,964		Sí	
3723,962		Sí	Sí

Cuadro 6: Inventario de armónicos de Sol para el ensayo sobre la posición del puente

En este caso, modificar ligeramente la posición hacia arriba cambia la coloración del sonido, mientras que desplazarlo hacia abajo empobrece la respuesta.

8.2.3. Cuerda de Re

Volvemos nuevamente a representar la respuesta del altavoz, para tener una referencia de las condiciones de partida:

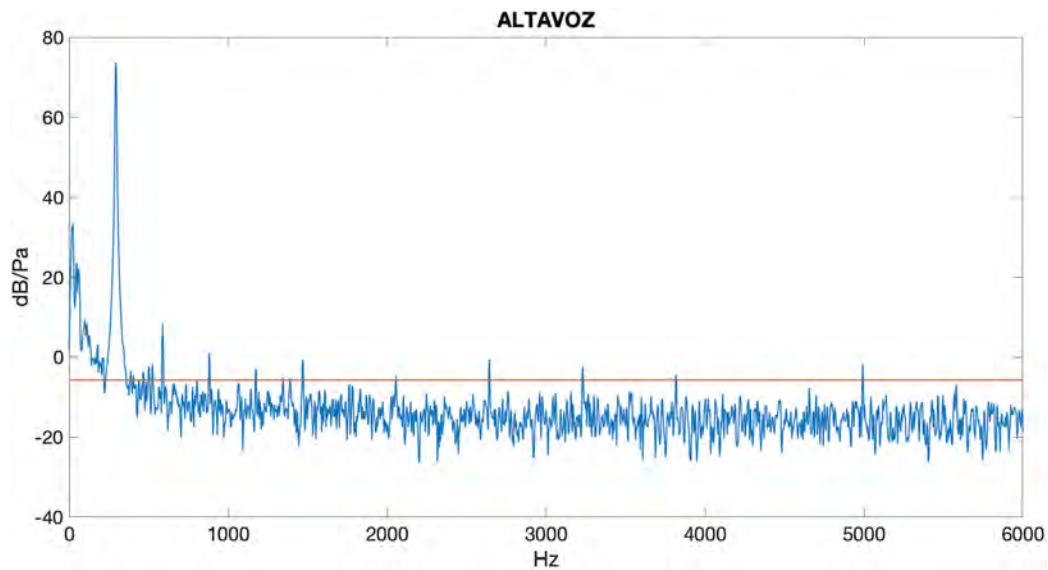


Figura 43: Espectro obtenido en la emisión de RE solamente con el altavoz

Aquí es donde el altavoz introducía un mayor número de armónicos, por lo que hemos de andar con más cuidado a la hora de identificar los armónicos de los diferentes escenarios, puesto que podrían ser identificados erróneamente. Los resultados obtenidos son los siguientes:

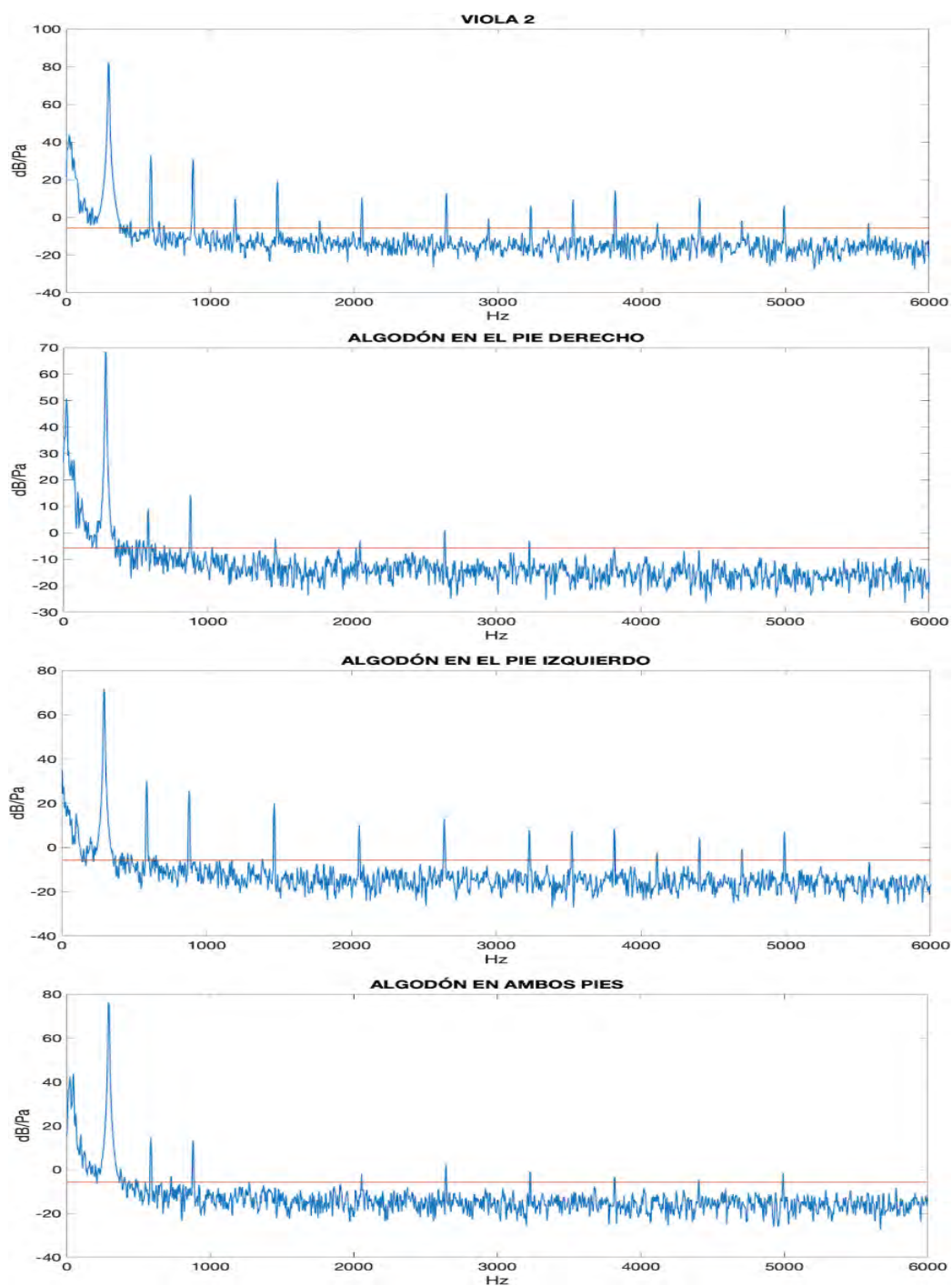


Figura 44: Espectros obtenidos en la emisión de RE para las diferentes posiciones

Aquí el ensayo es menos ambiguo. La respuesta del instrumento ante el Re era originalmente muy rica en armónicos, y vemos en los dos casos como se empobrece incluso drásticamente. Con el puente arriba los armónicos van perdiendo potencia y desapareciendo, y aún más sucede con el caso del puente abajo, que deja incluso grandes lagunas en que no se observa armónico alguno.

Armónicos de RE (Hz)	Viola 2	Puente arriba	Puente abajo
293,665	Sí	Sí	Sí
587,330	Sí	Sí	Sí
880,995	Sí	Sí	Sí
1174,660	Sí	Sí	
1468,325	Sí	Sí	Sí
1761,990	Sí		
2055,655	Sí	Sí	Sí
2349,320			
2642,985	Sí	Sí	Sí
2936,650	Sí		
3230,315	Sí	Sí	Sí
3523,980	Sí	Sí	
3817,645	Sí	Sí	
4111,310	Sí		
4404,975	Sí	Sí	
4698,640	Sí		
4992,305	Sí	Sí	Sí
5285,970			
5579,635	Sí		

Cuadro 7: Inventario de armónicos de Re para el ensayo sobre la posición del puente

Claramente, modificar la posición del puente en esta frecuencia es una mala decisión, ya que la respuesta de un instrumento de gran riqueza va a venir penalizada en cualquiera de los casos. Cambia la coloración, pero en ningún caso para bien, ya que muchos de los armónicos van a desaparecer.

8.2.4. Cuerda de La

Pasemos a ver el último caso, con la cuerda de La, como siempre, examinando la emisión del altavoz y los armónicos que este genera:

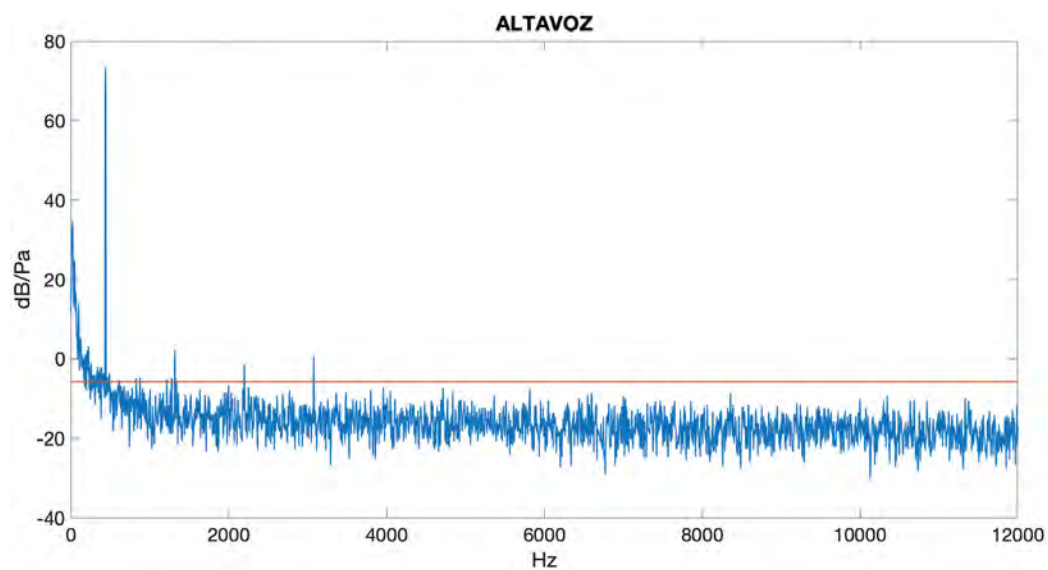


Figura 45: Espectro obtenido en la emisión de LA solamente con el altavoz

El altavoz se estabiliza en esta frecuencia, volviendo a mostrar un número de armónicos similar al de las dos primeras notas. Mostramos a continuación los resultados para los diferentes escenarios:

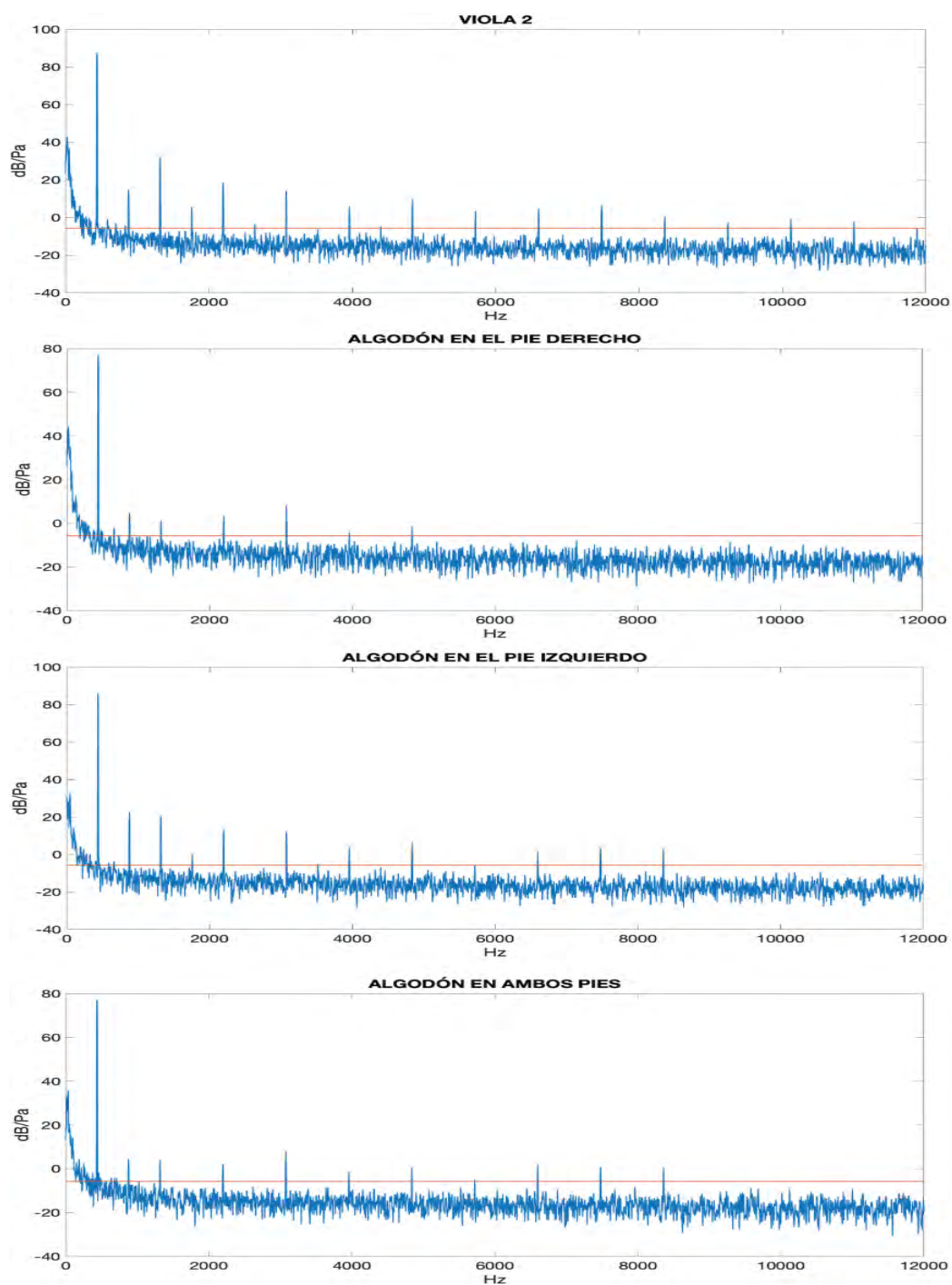


Figura 46: Espectros obtenidos en la emisión de LA para las diferentes posiciones

Como ya sucediera en el caso del Sol, las consecuencias siguen la misma tendencia. Una posición superior del puente hace que vayan desapareciendo los armónicos, mucho más en el caso del puente desplazado hacia abajo, que tiene consecuencias drásticas (como sucedía en baja frecuencia).

Armónicos de La (Hz)	Viola 2	Puente arriba	Puente abajo
440	Sí	Sí	Sí
880	Sí	Sí	Sí
1320	Sí	Sí	Sí
1760	Sí	Sí	
2200	Sí	Sí	Sí
2640	Sí		
3080	Sí	Sí	Sí
3520			
3960	Sí	Sí	Sí
4400		Sí	
4840	Sí	Sí	Sí
5280			
5720	Sí		
6160			
6600	Sí	Sí	
7040			
7480	Sí	Sí	
7920			
8360	Sí	Sí	
8800			
9240	Sí		
9680			
10120	Sí	Sí	
10560			
11000	Sí		

Cuadro 8: Inventario de armónicos de La para el ensayo sobre la posición del puente

Nuevamente, desplazar el puente, sea cual sea la dirección, es una mala

decisión, ya que hace que el sonido del instrumento sea mucho más pobre, especialmente en el último de los casos.

8.2.5. Conclusiones del ensayo

Desplazar el puente tiene algunas consecuencias de las que el músico puede llegar a aprovecharse, pero debe ser realizado con cautela:

- Desplazar el puente hacia arriba: Si bien es cierto que la respuesta en baja frecuencia aporta una mayor riqueza de armónicos (aunque también pueda tener un cierto grado de distorsión), a medida que la frecuencia va aumentando estos van desapareciendo. Por tanto, hacer ligeros desplazamientos del puente sobre la posición teórica podría mejorar la respuesta en notas más bajas y cambiar la coloración del sonido (que puede ser de mayor agrado al músico), pero en detrimento de empeorar la respuesta en alta frecuencia. Adicionalmente, esto conlleva un riesgo dramático. En este escenario concreto hemos encontrado el lobo a una frecuencia de 739,989 Hz correspondiente al Fa \sharp 4/Solb4 (F \sharp 5/Gb5). Si el músico quiere aprovechar las propiedades que favorece este tipo de desplazamiento en baja frecuencia debe ser consciente de la penalización en alta frecuencia y del terrible aumento de la susceptibilidad del tono del lobo, condición que puede llegar a ser innegociable.

Todo esto sigue la lógica de lo que hemos visto en el desarrollo teórico. Al alejar el puente del alma, que es una pieza que refuerza los agudos, el efecto que esta produce viene empeorado consecuentemente. Alejar el puente del alma impide que la transmisión de las vibraciones al cuerpo entero del instrumento se haga directamente, sino que, para que las vibraciones alcancen el conductor que supone este pequeño cilindro de madera deba recorrer una distancia mayor, con la consecuente atenuación de señal en el recorrido.

- Desplazar el puente hacia abajo: llevar el puente por debajo de la posición teórica es una mala decisión, ya que en todos los casos va a empeorar la respuesta en frecuencia del instrumento. No se recomienda en ninguno de los casos. Nuevamente estamos alejando el puente del alma, por lo que las consecuencias del caso anterior se suman a este.

8.3. Influencia de imperfecciones en el apoyo de los pies

Tras los experimentos realizados para comprobar la influencia que tiene la posición del puente en el instrumento, desarrollamos una serie de ensayos basados en la influencia que tiene en el timbre del instrumento un apoyo con imperfecciones o alteraciones respecto a las condiciones originales. Todos los escenarios que propondremos serán realizados sobre la viola 2, que es la que hemos utilizado para todos los ensayos de este capítulo, y la posición en la que situaremos el puente será la teórica, sobre la línea imaginaria que une los travesaños de los orificios en forma de f . La curvatura de los pies del puente es la idónea para esa zona concreta del cuerpo del instrumento, por lo que simplemente alteraremos el apoyo con un trozo de algodón, que servirá a la vez de apoyo imperfecto (ya que es un material muy poroso) y ligeramente aislante, para destacar y realzar las consecuencias de una mala construcción.

Para el primero de los escenarios procederemos de manera similar a como hicimos anteriormente. Partiremos de la posición original del puente y no tocaremos el apoyo de los pies. El mismo ensayo que realizamos en el capítulo del timbre de esta viola, así como el que utilizamos en el apartado referente a la posición del puente, será el que reaprovecharemos, suponiendo que estas condiciones de partida son las mismas para todos los casos. Será la referencia a partir de la cual estableceremos comparaciones respecto del sonido que el *luthier* ha considerado óptimo para este instrumento.

El segundo de los escenarios consiste en colocar un pequeño trozo de algodón de unos 2 mm de grosor (aunque comprimido a gran presión puede llegar a rondar 1 mm) bajo el pie derecho del puente, que es el que se sitúa cerca del alma (a unos 6 mm aproximadamente, como hemos visto en el apartado anterior). Este pie del alma es el encargado de reforzar la respuesta en agudos del instrumento, por lo que intuitivamente, al haber un apoyo imperfecto e irregular, así como la presencia de un material aislante entre el puente y el cuerpo del instrumento, se reducirá la cantidad de vibraciones drenada a la tapa y se penalizará la respuesta de los armónicos en alta frecuencia.

El tercer escenario propuesto es la continuación del anterior, y consiste en situar un trozo de algodón similar pero en el pie derecho. Este se localizaba sobre la barra armónica, que reforzaba la respuesta en frecuencia del instrumento, pero en este caso en registro grave. Intuitivamente podemos predecir algunas de las consecuencias que ocurrirán. En el caso anterior sugeríamos que la cantidad de vibraciones drenada por el puente en este punto sería me-

nor, pero ahora la respuesta que vendrá penalizada será la de baja frecuencia. Además, en un rango de frecuencias más bajas tiene un movimiento torsional, y rota en torno pie izquierdo, teniendo el derecho más libertad de movimiento. No obstante, al absorber el algodón parte de las vibraciones, absorberá también el movimiento que antes venía provocado por la vibración de la tapa superior, haciendo que el sistema sea ligeramente más amortiguado.

El cuarto y último escenario es también consecuencia lógica del experimento. Ahora colocaremos el algodón bajo los dos pies del puente, haciendo que el apoyo sea completamente imperfecto y se sitúe todo él sobre una superficie absorbente. La lógica nos lleva a concluir que los efectos que antes hemos analizado por separado se suman en este caso, dando lugar a un puente con menor libertad de movimiento, pobre respuesta en todo el rango de frecuencias, mala transmisión de las vibraciones por la absorción en el algodón, etc. Las consecuencias que extraigamos en ambos casos se sumarán ahora para dar lugar a un puente de mala calidad que podrá llegar a tener consecuencias drásticas en el sonido.

Como en el apartado anterior, los diferentes casos de ensayo pueden ser visualizados claramente mediante fotografías incluidas en el inventario de instrumentos, en la sección A. De nuevo, la afinación deberá ser controlada y corregida con mayor frecuencia de lo habitual, por la naturaleza de los cambios que estamos realizando en el instrumento y su influencia en él. Si queremos realizar un estudio haciendo sonar al instrumento mediante vibración por simpatía, la concordancia de frecuencias entre la señal emitida y la nota de afinación de la cuerda debe ser lo más precisa posible para que las consecuencias que extraigamos *a posteriori* no sean herencia de un mal control de ensayo. Pasemos entonces a analizar los resultados obtenidos.

8.3.1. Cuerda de Do

Como siempre, lo primero que tenemos que hacer es volver a recordar cuál es la respuesta del altavoz ante la emisión de esta nota.

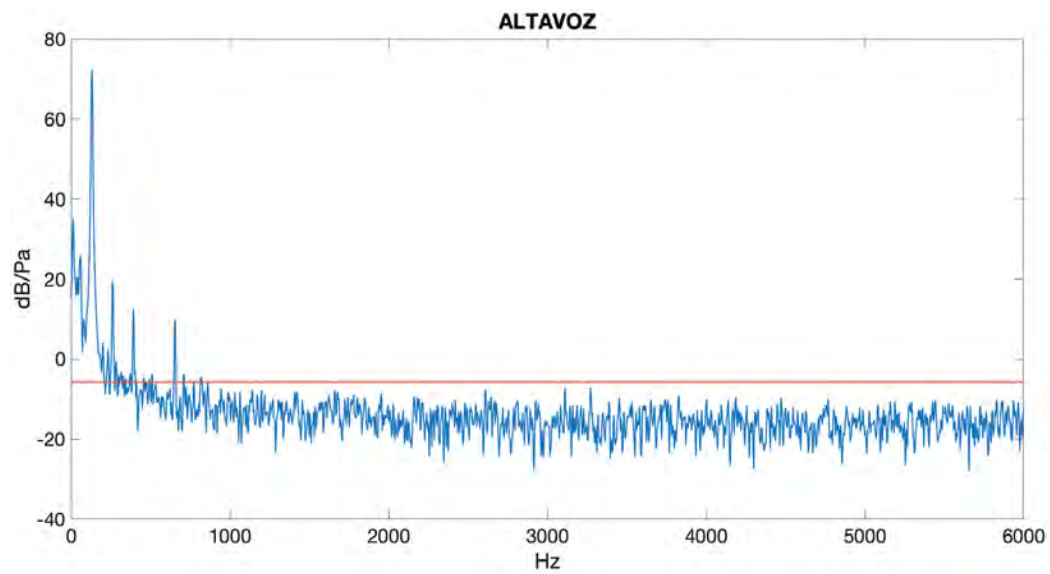


Figura 47: Espectro obtenido en la emisión de DO solamente con el altavoz

El altavoz solamente introducía tres armónicos adicionales al tono puro en la frecuencia de 130,813 Hz, siendo el mejor de los cuatro casos. Pasemos a visualizar la respuesta en los diferentes escenarios.

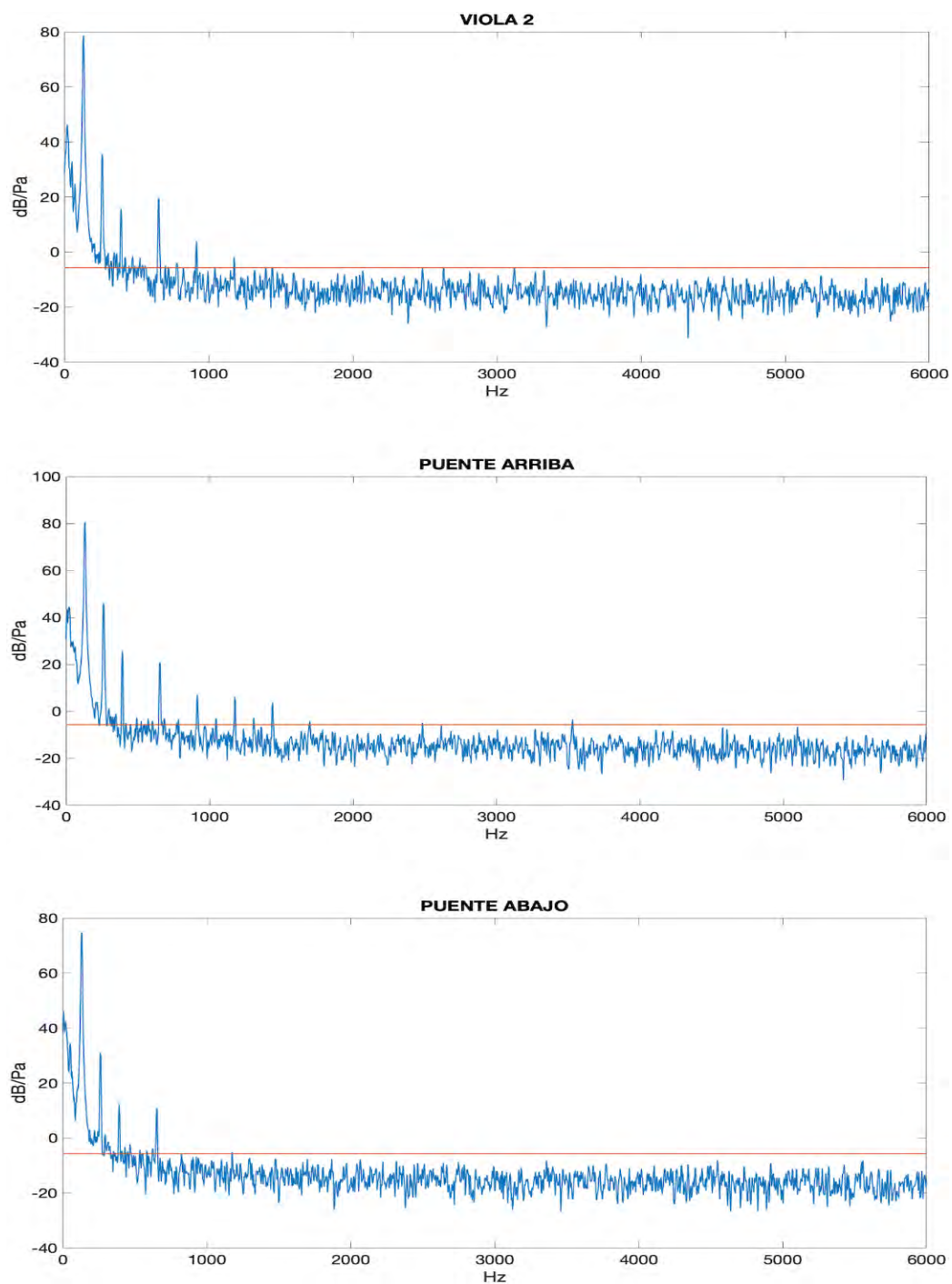


Figura 48: Espectros obtenidos en la emisión de DO para los diferentes apoyos

Claramente podemos observar que situando el algodón bajo el pie situado cerca del alma, la influencia no es demasiado grande, ya que es el responsable del refuerzo en alta frecuencia. Desaparece uno de los armónicos y se atenúa en general la señal, pero las consecuencias apenas son perceptibles. Si destaca, y mucho, la gráfica que muestra lo que pasa cuando colocamos un algodón bajo el pie izquierdo, responsable de la respuesta en graves. Aparecen muchísimos armónicos, armónicos que no estaban en la respuesta original, pares e impares, desapareciendo la tendencia par más o menos habitual. En este caso (lo pude escuchar claramente, y quedó claro en la grabación), aparece un nivel de distorsión terrible e inadmisibles. Por último, la respuesta obtenida cuando colocamos un algodón bajo ambos pies es calcada a la del altavoz. Todo lo que aparecía en la viola con el puente correctamente colocado desaparece, aunque no aparece esta distorsión que hemos visto en el caso anterior. Es igualmente una situación inadmisibles, porque se empobrece, y mucho, el sonido del instrumento.

Armónicos de Do (Hz)	Viola 2	Pie derecho	Pie izquierdo	Ambos pies
130,813	Sí	Sí	Sí	Sí
261,626	Sí	Sí	Sí	Sí
392,439	Sí	Sí	Sí	Sí
523,252			Sí	
654,065	Sí	Sí	Sí	Sí
784,878			Sí	
915,691	Sí	Sí	Sí	
1046,504	Sí		Sí	
1177,317	Sí	Sí	Sí	
1308,130				
1438,943			Sí	

Cuadro 9: Inventario de armónicos de Do para el ensayo sobre los pies del puente

Si el puente está mal construido y el apoyo del pie izquierdo no es óptimo, las consecuencias en baja frecuencia pueden llegar a ser imperceptibles. Si, en cambio, el pie defectuoso es el derecho, las consecuencias en baja frecuencia (que es precisamente el rango en que es más determinante) pueden llegar a ser catastróficas, introduciendo un nivel de distorsión bastante elevado.

Por último, un mal ajuste en ambos pies, si bien es cierto que no tiene por qué introducir distorsión, empobrecerá claramente la transmisión de las vibraciones y el sonido sería mucho más débil y apagado.

8.3.2. Cuerda de Sol

Representamos lo que ocurre al emitir nuestro altavoz un tono a la frecuencia de 195,998 Hz:

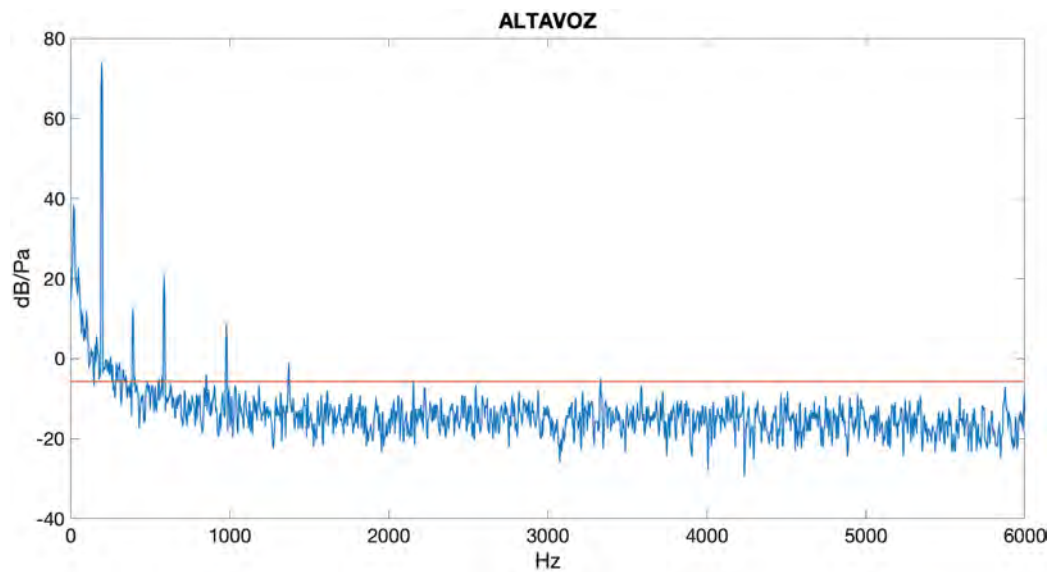


Figura 49: Espectro obtenido en la emisión de SOL solamente con el altavoz

El número de armónicos que introduce el altavoz es mayor, pero sin ser el peor de los casos. Pasemos a visualizar entonces las respuestas relativas a los tres diferentes escenarios:

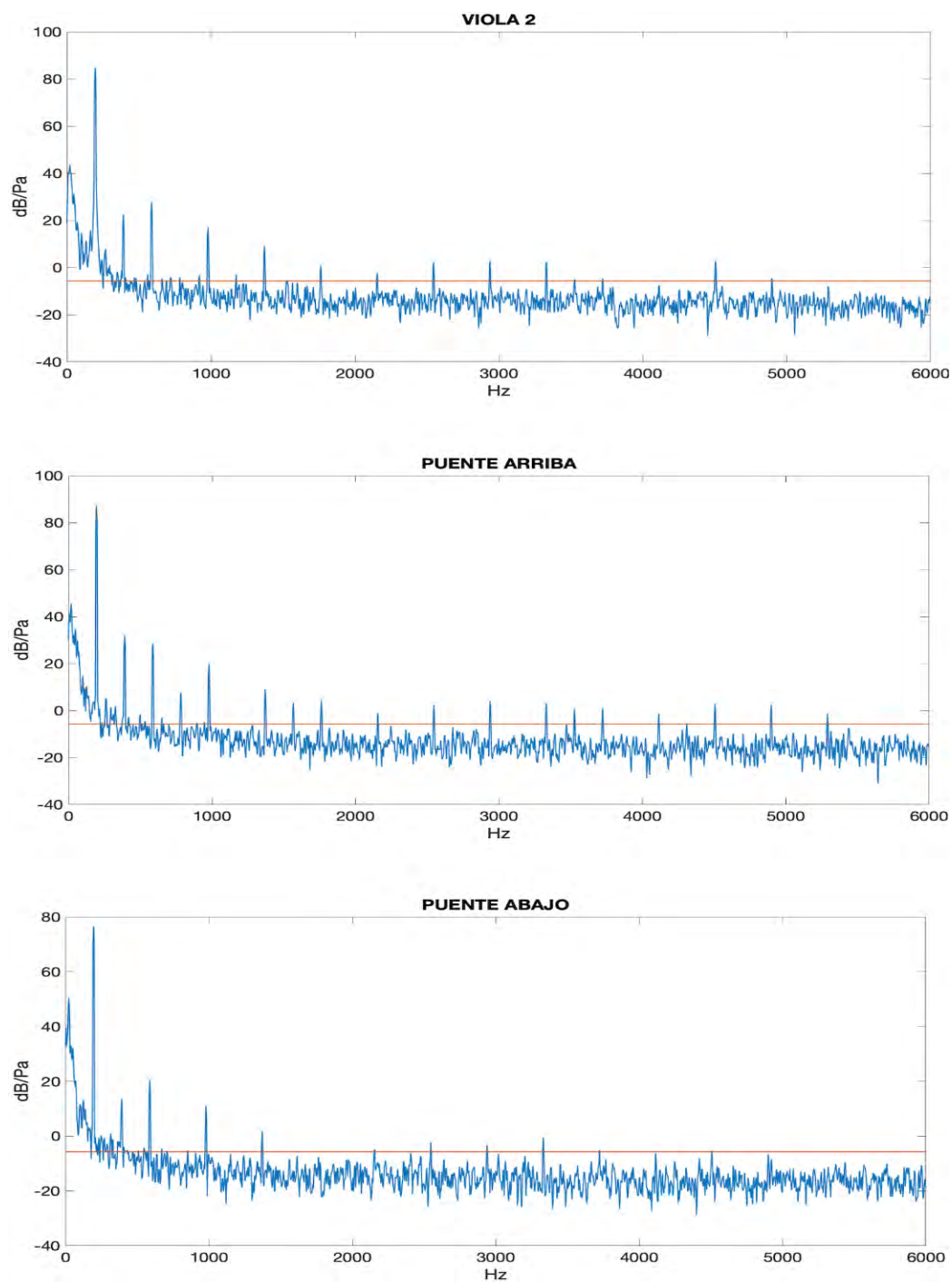


Figura 50: Espectros obtenidos en la emisión de SOL para los diferentes apoyos

Al ir aumentando la frecuencia, podemos notar que el pie derecho, situado cerca del alma, comienza a empeorar la respuesta del instrumento, haciendo que algunos de los armónicos desaparezcan, sobre todo generándose lagunas en que desaparecen varios armónicos seguidos. Podemos también destacar la importancia de esta pieza, ya que la frecuencia de afinación de la cuerda Sol es la segunda más baja, y ya se empiezan a notar los efectos que tiene en la atenuación del sonido el deterioro de la conexión entre el puente y la tapa superior del instrumento, y consecuentemente, la vibración drenada a todo el cuerpo de la viola. Si tomamos la respuesta del puente con algodones en ambos pies, ambas son muy parecidas, lagunas incluidas. Nos da indicios de que un apoyo imperfecto en ambos pies penaliza el sonido y la respuesta de los armónicos, pero no en un grado tan alto como sucedía en el caso del Do. Por último, observando lo que sucede cuando puente con imperfecciones en el pie izquierdo, siguen apareciendo armónicos que pueden dar indicios de ligera distorsión, pero todo se estabiliza notablemente. Las consecuencias no son tan apreciables como sucedía en el caso del Do.

Armónicos de Sol (Hz)	Viola 2	Pie derecho	Pie izquierdo	Ambos pies
195,998	Sí	Sí	Sí	Sí
391,996	Sí	Sí	Sí	Sí
587,994	Sí	Sí	Sí	Sí
783,992				
979,990	Sí	Sí	Sí	Sí
1175,988	Sí			
1371,986	Sí	Sí	Sí	Sí
1567,984			Sí	
1763,982	Sí		Sí	
1959,980				
2155,978	Sí		Sí	
2351,976				
2547,974	Sí	Sí	Sí	Sí
2743,972				
2939,970	Sí	Sí	Sí	Sí
3135,968				
3331,966	Sí	Sí	Sí	Sí
3527,964				
3723,962			Sí	Sí

Cuadro 10: Inventario de armónicos de Sol para el ensayo sobre los pies del puente

Las imperfecciones en la construcción del puente atenúan el sonido cuando el pie izquierdo está involucrado, esté o no mal construido el pie derecho. Si es solamente este último, las consecuencias no son tan graves en este rango de frecuencias, aunque podría introducirse un cierto grado de distorsión, en cualquier caso, mucho menor que el que aparecía en el caso del Do.

8.3.3. Cuerda de Re

Volvemos a ver en primer lugar el espectro de la respuesta del altavoz, sin estar involucrado el instrumento, para la nota de afinación de la cuerda de Re:

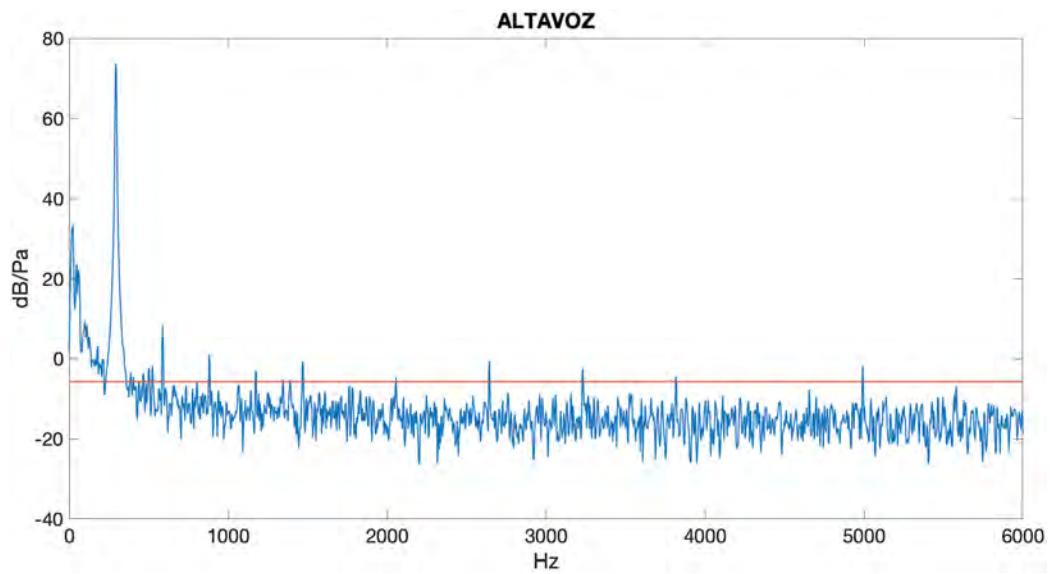


Figura 51: Espectro obtenido en la emisión de RE solamente con el altavoz

Nuestro altavoz tiene una respuesta bastante coloreada en este caso, por lo que, como en todos los casos anteriores, habremos de andar con cuidado. Estos son los resultados:

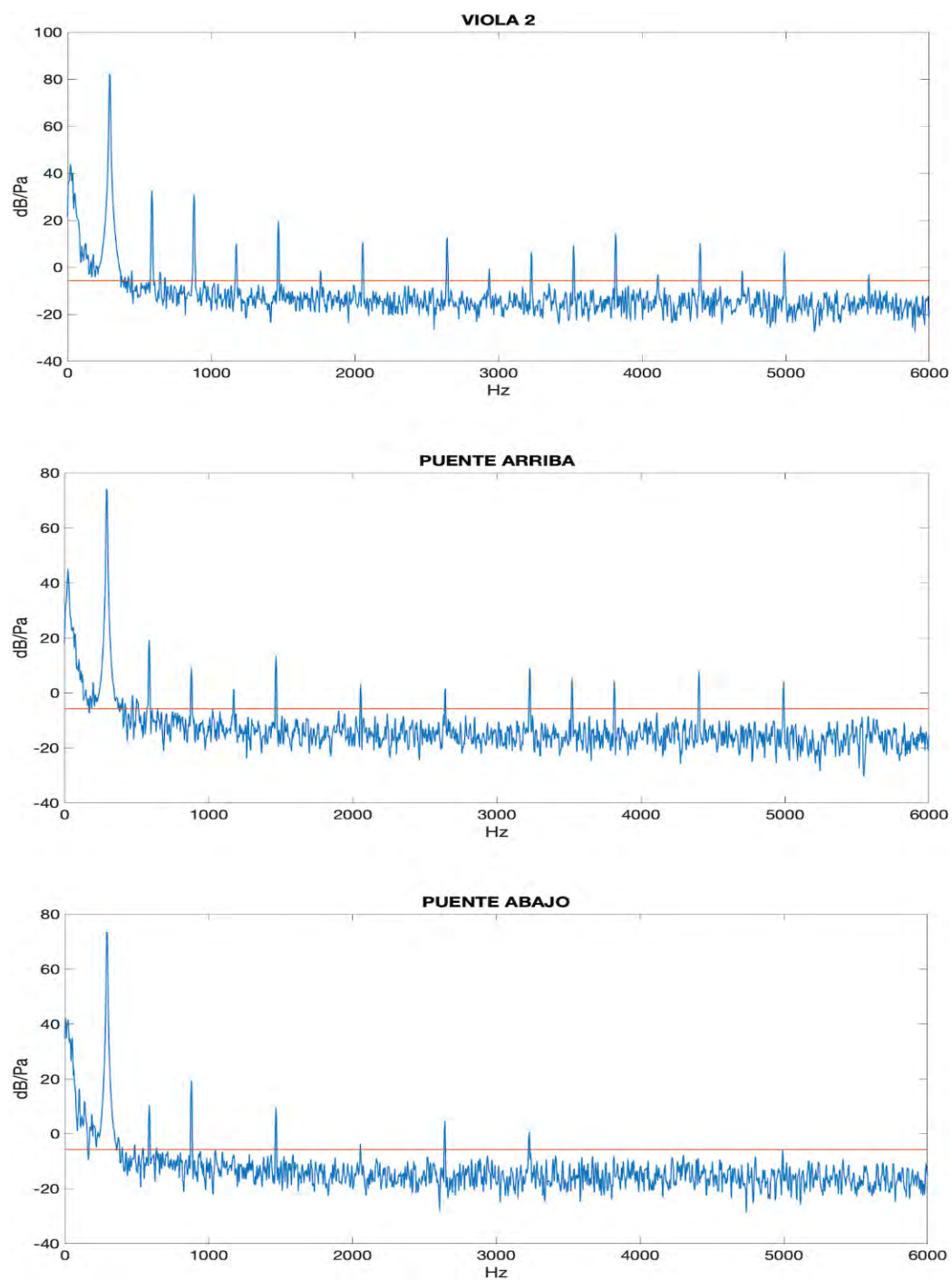


Figura 52: Espectros obtenidos en la emisión de RE para los diferentes apoyos

Estamos llegando a las frecuencias de afinación más altas, por lo que las consecuencias son aquellas que nos indicaba la teoría. El pie derecho se sitúa cerca del alma y es el encargado de reforzar la respuesta en alta frecuencia. Aquí ocurre todo lo contrario. Como hay elementos entre ambos (que además son absorbentes en este caso) la transmisión de las vibraciones se atenúa, y la coloración del sonido se empobrece en gran medida. En cambio, las consecuencias de que los problemas estén en el pie izquierdo no son tan fuertes (como sucedía en el caso del Do con el pie derecho). Es cierto que algunos armónicos desaparecen, pero no se aprecia una gran diferencia con el caso original. Curiosamente, cuando las imperfecciones están en ambos pies, parece como si los efectos de ambos se compensaran. Desaparecen armónicos, pero no en la medida que sucedía cuando los problemas estaban exclusivamente en el pie derecho.

Armónicos de Re (Hz)	Viola 2	Pie derecho	Pie izquierdo	Ambos pies
293,665	Sí	Sí	Sí	Sí
587,330	Sí	Sí	Sí	Sí
880,995	Sí	Sí	Sí	Sí
1174,660	Sí		Sí	
1468,325	Sí	Sí	Sí	
1761,990	Sí			
2055,655	Sí	Sí	Sí	Sí
2349,320				
2642,985	Sí	Sí	Sí	Sí
2936,650	Sí			
3230,315	Sí	Sí	Sí	Sí
3523,980	Sí		Sí	
3817,645	Sí		Sí	Sí
4111,310	Sí		Sí	
4404,975	Sí		Sí	Sí
4698,640	Sí		Sí	
4992,305	Sí		Sí	Sí
5285,970				
5579,635	Sí			

Cuadro 11: Inventario de armónicos de Re para el ensayo sobre los pies del puente

Una mala construcción del pie derecho del puente empeora notablemente la respuesta del instrumento ante esta nota, que es una de las que más resueña por lo general. Si hay una cuerda en que evitar este efecto es precisamente en esta, por lo que las consecuencias pueden ser realmente drásticas. Si los problemas suceden en el pie derecho la respuesta es ligeramente peor, pero bastante similar, si bien es cierto que desaparecen algunos armónicos. Curiosamente, cuando el puente es defectuoso del todo, los efectos se compensan, aunque igualmente empobrecen el sonido y cambian el color.

8.3.4. Cuerda de La

Veamos, por último, el caso de la cuerda de La, partiendo de la respuesta del instrumento ante la emisión de un tono a la frecuencia de 440 Hz:

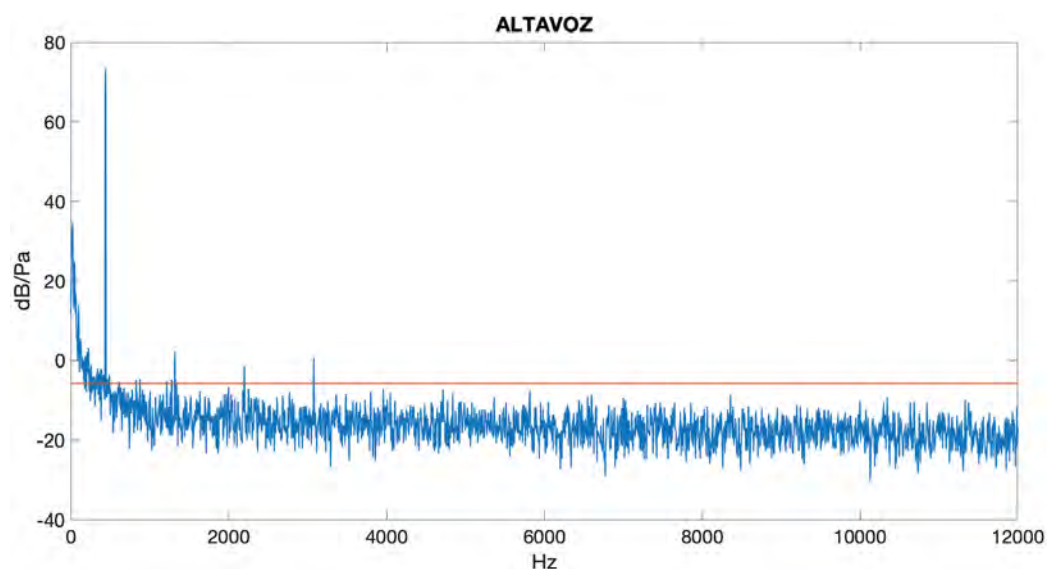


Figura 53: Espectro obtenido en la emisión de LA solamente con el altavoz

El altavoz no introducía más que tres armónicos, luego volvemos a una situación algo más favorable. Los resultados obtenidos son los siguientes:

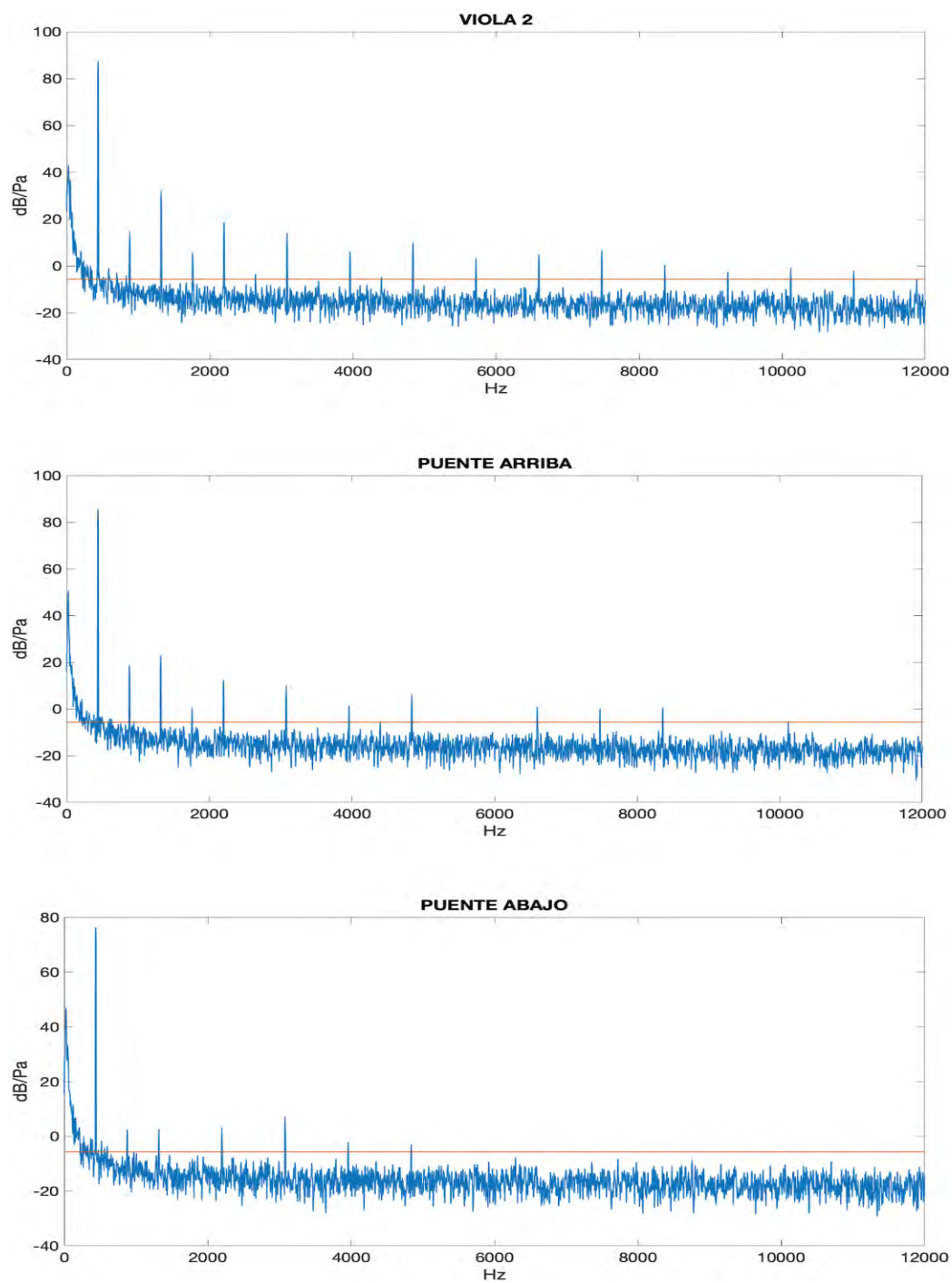


Figura 54: Espectros obtenidos en la emisión de LA para los diferentes apoyos

Nuevamente observamos que la respuesta en alta frecuencia para una mala construcción del pie derecho del puente es exageradamente pobre con respecto al caso original. Si los problemas vienen del pie izquierdo, la respuesta es más pobre, especialmente en los armónicos de orden mayor. Si los problemas están en ambos pies, nuevamente los efectos se mantienen, pero el sonido es igualmente más pobre aún.

Armónicos de La (Hz)	Viola 2	Pie derecho	Pie izquierdo	Ambos pies
440	Sí	Sí	Sí	Sí
880	Sí	Sí	Sí	Sí
1320	Sí	Sí	Sí	Sí
1760	Sí		Sí	
2200	Sí	Sí	Sí	Sí
2640	Sí			
3080	Sí	Sí	Sí	Sí
3520			Sí	
3960	Sí	Sí	Sí	Sí
4400				
4840	Sí	Sí	Sí	Sí
5280				
5720	Sí			Sí
6160				
6600	Sí		Sí	Sí
7040				
7480	Sí		Sí	Sí
7920				
8360	Sí		Sí	Sí
8800				
9240	Sí			
9680				
10120	Sí			
10560				
11000	Sí			

Cuadro 12: Inventario de armónicos de La para el ensayo sobre los pies del puente

En la tabla se aprecia claramente que una mala construcción del pie derecho genera grandes problemas en alta frecuencia, produciéndose un silencio muy temprano de armónicos para esta nota. También podemos ver la similitud entre los dos últimos casos, siendo más pobre la del puente globalmente mal construido.

8.3.5. Conclusiones del ensayo

Los resultados muestran datos bastante esclarecedores, y confirman fielmente la teoría, pero con datos numéricos sobre la influencia concreta en el timbre del instrumento. Analicemos brevemente cada caso:

- Defectos en el pie derecho: Los datos nos muestran que este pie tiene una importancia mayor, ya que, si bien es cierto que ante el Do los problemas no aparecen, estos se incrementan de manera exponencial a medida que vamos ascendiendo en la frecuencia. Al estar en fuerte conexión con el alma, las vibraciones en todo el rango frecuencial vendrán penalizadas, haciendo que los armónicos desaparezcan, esfumándose en silencios muy tempranos. El pie derecho es fundamental por su localización y sus consecuencias en el sonido cuando las cosas no van bien. No hemos encontrado en este caso el tono del lobo.
- Defectos en el pie izquierdo: El gran problema de los defectos en este pie es, no solamente, el empobrecimiento de la respuesta en baja frecuencia (y en general en todo el rango frecuencial, aunque en menor medida al aumentar la frecuencia), sino sobre todo la introducción de un grado elevado de distorsión en el rango frecuencial más bajo, correspondiente a la cuerda de Do. Las consecuencias en más altas frecuencias no son tan drásticas, pero sí aparece un gran deterioro del número de armónicos igualmente. No hemos encontrado en este caso el tono del lobo.
- Defectos en ambos pies: Los efectos en este caso son una combinación de lo anterior. En baja frecuencia la respuesta es bastante pobre, pero a medida que aumenta la frecuencia los efectos se estabilizan. Se produce una pérdida de armónicos en todos los demás rangos frecuenciales, aunque no son tan drásticos como se podría esperar en un primer momento. Igualmente, el sonido que resulta será siempre bastante más pobre que en el caso original. No hemos encontrado en este caso el tono del lobo.

El puente es una pieza de vital importancia para el instrumento, y errar en su construcción tiene consecuencias drásticas en el sonido, que en ningún caso pueden ser negociables. La curvatura de los pies debe ser la idónea para que el contacto con la tapa superior del cuerpo se ajuste de la manera más precisa posible, a fin de que las vibraciones que se drenan provenientes de las cuerdas puedan conectar con el cuerpo del instrumento., y la atenuación que se produce durante el proceso de transmisión sea la menor posible. La habilidad de los *luthier* para llegar a desarrollar los puentes y sus ajustes para cada instrumento es, por tanto, crucial para la producción de un sonido de calidad. Además, debe asegurarse de que exista el menor número posible de imperfecciones entre los dos objetos, por las mismas razones.

Desarrollar métodos mecánicos más precisos para el ajuste de esta pieza puede ser una línea futura abierta a la búsqueda de una máxima precisión y optimización de la respuesta del instrumento en todo el rango frecuencial, que desarrollaremos brevemente en el capítulo de conclusiones (sección 9).

9. Conclusiones

En este último capítulo trataremos de resumir sintéticamente los resultados y descubrimientos una vez terminado el recorrido propuesto.

9.1. Objetivos cumplidos

A lo largo del presente trabajo hemos podido profundizar en el conocimiento del instrumento desde un acercamiento científico, que nos ha iluminado acerca de los puntos clave donde hemos de poner el foco a la hora de buscar la calidad de un instrumento como la viola. El recorrido histórico nos ha llevado a la comprensión de por qué la viola ha llegado a nosotros tal y como la conocemos hoy en día. Mediante el análisis de sus partes hemos podido determinar los elementos más importantes para la producción de sonido, y entre ellos, los más sensibles a defectos y desajustes.

Mediante la simplificación del instrumento a través de las analogías utilizadas en el campo de la acústica hemos podido caracterizar, al menos someramente, cómo se interconectan los diferentes elementos, y qué función tienen en el conjunto. Han aparecido piezas fundamentales, como el puente o el alma, responsables de la transmisión de vibraciones en el instrumento. Se nos ha abierto el camino hacia la comprensión de las resonancias fundamentales del cuerpo y del aire contenido en él, así como los efectos que combinación estas tienen en el sonido, apareciendo fenómenos tales como el tono del lobo, debido a la conjunción de todos estos hechos. El estudio modal nos ha permitido comprender la estructura vibratoria del cuerpo y de la tapa superior, dándonos unas claves que nos han ayudado en el análisis de los ensayos posteriores.

Hemos podido también descubrir el porqué del tono del lobo, su manifestación práctica y algunos medios para controlarlo. También hemos descubierto algunas condiciones que aumentan la susceptibilidad de la aparición de este, como el hecho de desplazar el puente más arriba de lo debido, la escalabilidad y el tamaño. Que un instrumento sea menos susceptible, o que incluso, se pueda considerar inmune, será un buen parámetro a la hora de justificar su calidad. El estudio del timbre ha arrojado luz también sobre su relación con la riqueza del sonido, pudiendo visualizar mediante espectros la cantidad, relación y uniformidad de los armónicos para diferentes registros tonales, aportándonos una imagen clara de qué está pasando en el instrumento cuando es ejecutado.

Un estudio más profundo sobre el puente ha reforzado la consciencia de que es una de las piezas más importantes en el conjunto del instrumento, y los diversos ensayos que hemos realizado nos han mostrado concretamente cuáles son los peligros, riesgos e incluso utilidades de alterar la posición del puente o que existan defectos en su construcción. Errar en el desarrollo de esta pieza, así como ajustarla incorrectamente, tiene consecuencias enormes en el sonido final, por lo que no es un punto a dejar de lado. Además, las conclusiones nos pueden servir de ayuda a la hora de identificar posibles problemas en la emisión.

9.2. Líneas futuras

La principal línea futura que se presenta a este trabajo es la continuación de la investigación. En un proyecto de fin de grado no es posible abordar la cuestión con la profundidad con la que debería ser realizada, por lo que nos hemos visto obligados a simplificar y descartar algunos temas que habríamos deseado desarrollar.

El estudio de la viola a modo de transductor mecánico-acústico es llevado a cabo sin una gran precisión numérica, incluso Schelleng en su artículo muestra que aportar números adecuados para, por ejemplo, los valores de los componentes electrónicos implicados conllevaría una investigación mucho más profunda y delicada. Desarrollar un modelo de circuito análogo con precisión en que se puedan dar valores a cada uno de los elementos con números concretos puede ser una manera de caracterizar precisamente cada viola.

El estudio modal de la tapa superior que hemos analizado [17] ha sido realizado mediante simulación partiendo del modelo del violín. Además, durante el trabajo ha ido apareciendo recurrentemente la cuestión del escalado imperfecto de la viola con respecto del violín. La distribución de los modos sería la misma si la escala fuera exacta, pero no lo es. Esto podría ocasionar algún cambio en la distribución de los máximos y mínimos, aunque suponemos que las diferencias de patrones no serían muy diferentes. Una línea futura de investigación consistiría en la determinación de la estructura vibratoria, así como de las distintas frecuencias fundamentales para el caso concreto de la viola estableciendo una determinación precisa de los patrones modales que se forman en diferentes instrumentos (contando también con el hecho de que existen distintos tamaños posibles, desde 38 cm hasta 42 cm, pudiendo incluso exceder tales límites) y compararlos con los de un violín de

talla 4/4, que es el utilizado por prácticamente todos los violinistas adultos (con raras excepciones), a fin de determinar el alcance de estas diferencias.

Adicionalmente se podría simular (o incluso determinar mediante métodos más precisos) la frecuencia fundamental de un buen número de violas, de diferente tamaño y calidad. Sería de especial interés hacer pruebas y ensayos con violas antiguas de gran tamaño, superiores a 43 cm, como las que se construían en los primeros años en Brescia o Cremona [2]. Esto nos permitiría determinar si el tamaño tiene una influencia notoria en esta frecuencia fundamental de resonancia, si estas son constantes o varían notablemente entre instrumentos, haciendo que unas violas fueran más adecuadas para un determinado repertorio u otro, si su contribución en la música para orquesta u otras agrupaciones musicales es diferente y desequilibrada en términos de efectividad espectral y radiación sonora debido a la resonancia en frecuencias distintas.

Además, nos permitiría hacer una aproximación a la hora de buscar la posible frecuencia en que pudiera aparecer el terrible fenómeno del tono del lobo, ya que como afirma Schelleng, puede ocurrir cuando la fundamental está alrededor de medio o tono o menos de la frecuencia de resonancia [5]. Una vez determinadas dichas frecuencias sería interesante analizar desde el punto de vista musical cómo se relaciona tonalmente esa frecuencia fundamental con el resto de cuerdas, con la música del repertorio para viola del mismo modo que ocurre con el violín, etc. Lo lógico es que, manteniendo la estructura del violín y su relación con la viola, la frecuencia fundamental estuviera en torno al Sol3 (G4), de 391.995 Hz, pero es una mera intuición.

Vimos también que la simulación se realizaba sobre placas libres, lo cual no nos da una idea real del comportamiento vibratorio del instrumento, puesto que otros elementos, como por ejemplo, el alma, provocan una evidente asimetría en los patrones finales que se forman, que a fin de cuentas, es el que importa. Sería de gran interés realizar los cálculos a priori (de la tapa superior sin ensamblar) y a posteriori (del instrumento final) en violas reales, para determinar los cambios en los patrones modales, para determinar las frecuencias relativas a cada modo, la frecuencia fundamental, etc. Y esto debería ser caracterizado, inevitablemente, para cada instrumento individualmente, si los estudios sobre violas de diferente tamaño revelasen patrones modales diferentes o comportamientos aleatorios en función de factores como la talla o la escala.

Para las conclusiones que hemos extraído en los distintos ensayos, hemos partido exclusivamente de un análisis espectral, dejando de lado el acerca-

miento desde un punto de vista temporal. Es este uno de los puntos que desde un principio quisimos abordar pero tuvimos que dejar de lado. Completar este trabajo con conclusiones extraídas de un estudio temporal sería uno de los fuertes desafíos a afrontar.

Algunos elementos han salido del foco de nuestro análisis, como la calidad de los materiales, el estudio de la influencia de diferentes tipos de cuerdas y tensiones soportadas, la influencia de la presencia o no de microsensores, las consecuencias que tiene en el timbre el uso de la sordina, etc. Todos ellos podrían ser llevados a cabo en investigaciones posteriores.

La fuerza de los análisis de intercomparación viene dada por la cantidad de objetos sometidos a estudio. Lo ideal sería construir una base de datos en que almacenar los datos de un gran número de violas llevadas a ensayo, a fin de poder establecer conclusiones mucho más precisas e hilar fino a la hora de determinar la calidad de un instrumento en un conjunto suficientemente grande.

Sería un proyecto interesante el desarrollo de un estándar de calidad basado en el análisis sistemático de los parámetros que hemos ido valorando y de aquellos que no hemos podido desarrollar. Mediante un sistema automático de extracción de características, y utilizando aprendizaje máquina, podríamos llegar a desarrollar un sistema de *scoring* para la calidad de una viola en los diferentes aspectos particulares de manera precisa y también una puntuación global. Esto nos permitiría tasar de manera consistente y objetiva un instrumento, ajustándose lo máximo posible a la calidad del sonido que es capaz de producir.

Ha de ser tenido en cuenta que, si bien es cierto que en este trabajo nos hemos centrado en el estudio concreto de la viola, el mismo recorrido podría ser llevado a cabo en el resto de instrumentos de la familia. Existen ciertas diferencias, no obstante, que no pueden dejar de ser mencionadas. La forma del puente del violín y la viola es distinta a la que se da en el caso de violoncello y contrabajo. Este último, además, no se afina mediante intervalos de quinta justa, sino de cuarta³⁵, cambiando algunas propiedades armónicas que sí están presentes en los otros instrumentos. Además, el contrabajo puede tener tres, cuatro o cinco cuerdas. Y de la misma manera que hemos hecho un estudio de las propiedades de los instrumentos de esta familia, se

³⁵Las cuerdas del contrabajo se afinan (de más agudo a más grave) en Sol, Re, La y Mi. Si se partiera de Mi y se afinara por quintas justas (como el resto de instrumentos de la familia), las notas no serían estas, sino Do♯, Fa♯, Si y Mi.

podría hacer una caracterización de el resto de instrumentos, dedicando un tratado extenso a la orquesta sinfónica, banda, etc. El mismo desarrollo de un estándar calidad, pero mucho más amplio.

10. Marco regulador

En el presente capítulo se hará una revisión de la legislación aplicable sobre la implementación descrita en el trabajo. Al tratarse de un trabajo principalmente teórico y de investigación, la legislación aplicable en este caso no es muy amplia. No obstante, sí hemos de tener en cuenta una serie de puntos. En los capítulos 7 y 8 hemos llevado a cabo un grupo de ensayos en cámara anecoica haciendo uso de una instrumentación concreta. Para que las medidas que hemos tomado puedan tener validez oficial hemos de ajustarnos a una normativa que describiremos a continuación.

Las medidas deberían ser tomadas en un laboratorio que cumpla la normativa UNE-EN ISO 17025:2017. Esta define los requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Además, para justificar que dicho laboratorio sigue un sistema de calidad, sería óptimo que dicho laboratorio estuviera acreditado por ENAC (Entidad Nacional de Acreditación). Hay ciertas comunidades autónomas que solamente permiten documentos legales a empresas acreditadas por ENAC en virtud de esta normativa, donde la parte técnica tiene un valor fundamental. Esta empresa realiza una inspección inicial exhaustiva a aquellos laboratorios que quieren implantar un sistema de calidad por primera vez, y en caso de lograr la acreditación, esta se renueva o se pierde según auditorías periódicas realizadas cada 5 años. Incluso puede haber casos en que se realicen visitas de control, auditorías a destiempo en caso de cambio del director técnico, etc. Periódicamente se realizan auditorías internas para favorecer un sistema autorregulado. La documentación debe estar controlada y cuidada, justificándose trazabilidad y control de cambios en esta, y debe de conservarse al menos durante 5 años.

Dicho laboratorio debe definir el alcance, documento de las medidas que puede hacer de manera acreditada, distinguiendo claramente entre muestreo y medida (aunque en temas de acústica, la separación entre estos se diluye). A diferencia de empresas que se dedican a realizar medidas de ruido ambiental o aislamiento, donde la conclusión de los ensayos se da mediante una declaración de conformidad, un laboratorio donde queramos realizar nuestras medidas deberá poder emitir certificados de calidad para los instrumentos musicales según los procedimientos que proponemos en este trabajo.

No existe una normativa específica a los ensayos que proponemos, pero en caso de querer establecer una regulación, habría que determinar los planes de muestreo, el número de ensayos a realizar, los índices o espectros que se deben calcular y representar, la instrumentación acústica mínima necesaria,

las condiciones de ensayo, etc. Esta se ampliará a medida que la investigación avance y se desarrollen nuevos planes de ensayo, parámetros mensurables, o bien se perfeccionen los ya existentes. Además, ha de ser tomada en cuenta la incertidumbre de ensayo a la hora de determinar los diferentes resultados, desarrollando consecuentemente los distintos márgenes de tolerancia permisibles.

Cualquier herramienta que se desarrolla en el laboratorio tiene que cumplir tres cosas:

1. Que esté validada y que esté demostrado que los cálculos que realiza son correctos.
2. Una vez validada, esta tiene que protegerse para evitar que se pueda modificar el contenido de manera accidental.
3. Debe estar correctamente identificada.

El ensayo concluye con un informe de los resultados, que debe ser claro y conciso para el usuario final. Dentro del informe hay muchas partes, pero dos de ellas son las más importantes, el objeto del informe y la declaración de resultados. Ambos deben ser coherentes entre sí.

Las normativas exigen un control minucioso de la calidad de los instrumentos de medida, demostrando las capacidades de los equipos. En nuestro caso solamente haremos uso de un micrófono de medida y un altavoz. Al encontrarnos en un entorno anecoico, el micrófono debe ser de campo libre. Este debe estar calibrado en un laboratorio acreditado, así como el dispositivo que utilicemos para comprobar dicha calibración, que nos permitirá saber la dispersión de la medida que da nuestro micrófono ante la emisión de un tono puro de 94 dB a la frecuencia de 1 kHz, permitiendo las distintas normativas unos márgenes de aceptación. Tras la realización del ensayo deberá volver a comprobarse la calibración para asegurar que el micrófono no ha sufrido daños y las muestras son incorrectas, sometándose también a unos límites de desviación permisibles. Algunas normativas regulan la calibración de los altavoces, comprobando parámetros como la directividad o la potencia sonora.

Debe ponerse cuidado en que las medidas que se utilizarán para el análisis de los resultados no estén saturadas. Para ello, los diferentes equipos dispondrán de indicadores que puedan justificar la validez de las muestras tomadas.

La normativa UNE-EN ISO 17025:2017 define los requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración, pero de una manera genérica, ya que es aplicable a distintos campos. No es solamente para experimentación acústica, sino también química o geológica. Si bien es cierto que no existe una normativa específica para el tipo de ensayo que nosotros hemos propuesto en el presente trabajo, existen otras normativas de acústica que pueden aportar criterios interesantes, como son:

- El Real Decreto 1367/2007 por el que se desarrolla la Ley del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.
- La UNE-EN ISO 140-4:1999 y la UNE-EN ISO 16283-1:2015, para medida de aislamiento acústico al ruido aéreo entre locales.
- La normativa UNE-EN ISO 140-5:1999 para medida de aislamiento acústico al ruido aéreo de fachadas por el método global del altavoz.
- La normativa UNE-EN ISO 140-7:1999 para medida de aislamiento acústico de suelos al ruido de impactos.
- Las normativas UNE-EN ISO 3382-2:2008 y UNE-EN ISO 3382-2:2008 para la medida del tiempo de reverberación.
- La normativa UNE-EN 60942:2005 para calibradores acústicos.

Aunque la mayoría del contenido de estas normativas no es aplicable en nuestro caso, no obstante, introducen criterios interesantes que nos pueden aportar puntos clave a tener en cuenta, como, por ejemplo, la determinación de métodos para calcular las incertidumbres asociadas, para la caracterización de la directividad del altavoz y otros parámetros. Estas caracterizaciones van más allá del alcance de este Trabajo de Fin de Grado y por lo tanto hemos asumido que la cámara anecoica utilizada así como todo el instrumental empleado están correctamente calibrados y listos para ser usados en la manera en la que lo hemos hecho.

11. Entorno socio-económico

Para este capítulo se realizará un presupuesto, a fin de conocer el coste económico del proyecto. En él se detallará la inversión de tiempo, el gasto material y personal, para finalmente estimar un cálculo del coste total. Al final se hará un breve análisis del impacto socio-económico que podría suponer la realización del presente proyecto.

11.1. Presupuesto

En la tabla a continuación se hace una estimación del tiempo empleado en cada una de las tareas:

TAREA	TIEMPO EMPLEADO
Definición de los objetivos	10 h
Estudio de la documentación	180 h
Experimentación	60 h
Desarrollo de scripts	50 h
Análisis de los resultados	50 h
Redacción de la memoria	300 h
TOTAL	660 h

Cuadro 13: Cálculo del tiempo empleado para el desarrollo del proyecto

Una vez determinado el tiempo empleado en las tareas y tomando como referencia el informe del Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Telecomunicaciones (COITT) “Baremos de Honorarios Orientativos para Trabajos Profesionales”, los costes para “Trabajos por tiempo empleado” son 60 €/hora para el ingeniero del proyecto, y para la directora del proyecto 78 €/hora. Los costes por un músico profesional son de 70 €/hora. Con estos datos establecemos en la siguiente tabla el cálculo del coste empleado en Recursos Humanos para el desarrollo del proyecto.

NOMBRE	CATEGORÍA	TIEMPO	PRECIO	COSTE
Josué Fernández Villegas	Ingeniero	660 h	60 € / h	39600 €
Carmen Peláez Moreno	Directora Proyecto	66 h	78 € / h	5148 €
Josué Fernández Villegas	Músico	10 h	70 € / h	700 €
TOTAL				45448 €

Cuadro 14: Cálculo del coste de recursos humanos para el desarrollo del proyecto

El proyecto requiere asumir también una serie de gastos materiales. Entre ellos se encuentran el alquiler de la cámara así como de los instrumentos y el material para los ensayos, todo lo relacionado con el análisis computacional de los datos incluyendo el equipo y los distintos software que están involucrados, y por último el material adicional utilizado durante el proyecto. Los costes específicos vienen detallados en la tabla a continuación.

MATERIAL	PRECIO	COSTE
Alquiler de la cámara anecoica	6 x 300 € / día	1800 €
Alquiler de instrumentos	8 x 50 € / día	400 €
Alquiler de micrófono	6 x 30 € / día	180 €
Alquiler de altavoz	6 x 30 € / día	180 €
Ordenador personal	250 €	250 €
Brüel & Kjaer PULSE LabShop	300 €	300 €
Matlab	320 €	320 €
Material de oficina y fungible	250 €	250 €
TOTAL		3680 €

Cuadro 15: Cálculo del coste del material necesario para la realización del proyecto

Establecidos los costes personales y materiales, hemos de aplicar el Impuesto de Valor Agregado, que supone un incremento del 21 % sobre el total de los costes anteriores. Una vez añadido podemos concluir, según lo detallado en la siguiente tabla, que el coste total para la realización del proyecto

asciende a CINCUENTA Y SIETE MIL NOVECIENTOS TREINTA Y DOS EUROS CON TREINTA Y OCHO CÉNTIMOS (57932,38 €).

CONCEPTO	COSTE
Gastos personales	45448 €
Gastos materiales	3330 €
Base imponible	49128 €
I.V.A. (21 %)	10316,88 €
TOTAL	59444,88 €

Cuadro 16: Cálculo del coste total del proyecto

11.2. Impacto socio-económico

Hemos visto en el apartado de conclusiones (sección 9) que una de las líneas futuras que podría tener este trabajo sería el desarrollo de un sistema de calidad con el que aplicar una tasación más objetiva a instrumentos como la viola. Planteábamos al comienzo del trabajo la incertidumbre que a veces existe a la hora de saber si el precio aplicado se ajusta correctamente a la calidad del sonido o no. La implantación de un sistema de calidad objetiva podría convertirse en una marca universal que diera soporte a numerosos puntos de venta, desde talleres de *luthier* a casas especializadas. Tanto los clientes (que podrían obtener una referencia clara del tipo de producto que están comprando), como los vendedores (ya que podrían tener una certeza del producto de calidad que ofrecen, acreditado mediante métodos precisos) podrían beneficiarse de ello.

Un sistema así tendría un cierto coste para la casa que quisiera acreditarse como constructor o distribuidor de instrumentos de gran calidad, pero sería un precio a pagar en pos de obtener el respaldo de una marca que lo asegura con hechos probados. Los certificados de calidad podrían ser consultados, deberían ser renovados ante cambios bruscos, y serían almacenados en una base de datos de crecimiento exponencial (con el coste que aquello supondría) en que se guardarían los datos de una cantidad ingente de instrumentos distintos para la intercomparación y la tasación adecuada.

El coste que pudiera llegar a suponer a un *luthier* o una casa de ins-

trumentos la posesión de sello como centro acreditado podría, no obstante, llegar a repercutir en el precio final del instrumento, debido al incremento de gastos. Es un hecho no deseado, ya que la viola se tasa en virtud de una caracterización objetiva en base a parámetros como, por ejemplo, la riqueza del timbre en cuanto a número de armónicos. No debería falsearse el precio propuesto en virtud del resultado del estudio individual para cada caso. Para controlar que no suceda, la compañía responsable de aportar los certificados de calidad podría realizar inspecciones en los puntos de distribución que se encuentran inscritos a su programa de certificación.

La propuesta consiste en desarrollar lo que ya realizan compañías ENAC (Entidad Nacional de Acreditación), que certifica la calidad de laboratorios de ensayo, entre otros. Es tan importante este sello que incluso algunas comunidades autónomas, para la publicación de trabajos oficiales, solo permiten que estén realizados por laboratorios con su sello. La seguridad que para el cliente ofrece este tipo de actividades es un precio a pagar muy pequeño en comparación con los beneficios que aporta a su negocio.

APÉNDICE

A. Inventario de instrumentos y condiciones de ensayo

Para los experimentos realizados en los dos apartados anteriores hemos utilizado diversas violas o configuraciones del puente para generar los distintos escenarios de ensayo. En este breve capítulo haremos una descripción somera de los protagonistas del estudio.

A.1. Violas para el estudio del timbre

Para este ensayo hemos hecho uso de cuatro instrumentos diferentes, que describiremos a continuación:



Figura 55: Grupo de violas llevadas a ensayo en la sección 7.3

- Viola #1: viola de 38 cm, construida por Sielam para la casa Hazen en el siglo XX, valorada en alrededor de 1000€.
- Viola #2: viola 35,7 cm, reconstruida por el *luthier* Laurent López, valorada en alrededor de 700€.

- Viola #3: viola de 38 cm, construida por un luthier anónimo en Rusia en el siglo XIX, valorada en más de 3000€.
- Viola #4: viola de 38 cm, construida por Sielam para la casa Hazen en el siglo XX, valorada en alrededor de 900€.

A.2. Condiciones para el estudio de la influencia de la posición del puente

Para los ensayos relativos a la influencia de la posición del puente, hemos hecho uso de la viola 2 y colocado el mismo en tres lugares distintos:



Figura 56: Posiciones del puente para la realización de los ensayos de la sección 8.2

- Escenario 1: Puente en su posición teórica y situado originalmente por el *luthier*.
- Escenario 2: Puente situado 30 mm por encima de su posición original.
- Escenario 3: Puente situado 25 mm por debajo de su posición original.

A.3. Condiciones para el estudio de la influencia de imperfecciones en el apoyo de los pies del puente

Para los ensayos relativos a la influencia de imperfecciones en el apoyo de los pies del puente, hemos hecho uso de la viola 2 y hemos colocado un pequeño trozo de algodón bajo los pies, manteniendo la posición original del puente, de la siguiente manera:



Figura 57: Situación de algodones bajo los pies del puente en los distintos casos de ensayo de la sección 8.3

- Escenario 1: Puente en su estado original, con el ajuste apropiado de los pies del puente a la curvatura del instrumento en su posición concreta.
- Escenario 2: Puente con un pequeño trozo de algodón bajo el pie derecho, situado cerca del alma.
- Escenario 3: Puente con un pequeño trozo de algodón bajo el pie izquierdo, situado sobre la barra armónica.
- Escenario 4: Puente con un pequeño trozo de algodón bajo los dos pies.

Referencias

- [1] Gabou, *Temario Oficial para las Oposiciones al Conservatorio, Especialidad instrumental: viola*. 2019.
- [2] M. Riley, *The History of the Viola*, ép. The History of the Viola v. 1. Braun-Brumfield, 1980, ISBN: 9780960315000.
- [3] M.-C. Beltrando-Patier, *Historia de la Música, La música occidental desde la Edad Media hasta nuestros días*, Espasa, ed., con intr. de P. de Mark Honegger.
- [4] C. J. Costas, *Música para viola*, F. J. March, ed., 1990.
- [5] J. Schelleng, «The Violin as a Circuit», *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 35, n.º 3, págs. 326-338, 1963, ISSN: 00014966.
- [6] F. A. Saunders, «The mechanical action of violins», *Journal of Acoustical Society of America*, 1937.
- [7] J. Schelleng, «The bowed string and the player», *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 53, n.º 1, págs. 26-41, 1973, ISSN: 00014966.
- [8] H. Meinel, «Über Frequenzkurven von Geigen», *Akustische Zeitschrift*, 1936.
- [9] B. OpenMind. (2015). Dennis Gabor, "padre de la holografía". B. OpenMind, ed., dirección: <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/grandes-personajes/dennis-gabor-el-padre-de-la-holografia/>.
- [10] V. P. García, «Los instrumentos de arco y el tono del lobo», *Revista de acústica*, vol. 46, n.º 3 y 4, 2015.
- [11] J. Woodhouse, «On the playability of violins, Minimum bow force and transients», *Acustica*, vol. 78, 1993.
- [12] N. H. Fletcher, *The physics of musical instruments*, eng, 2nd ed. New York [etc.: : Springer, 1998, ISBN: 0387983740.
- [13] J. A. Moral y E. Jansson, «Eigenmodes, input admittance and the function of the violin», *Acústica*, 1982.
- [14] M. Schleske, «Eigenmodes Of Vibration In The Working Process Of A Violin, Workshop for Violin Making», *Catgut Acoustical Society Journal*, 1996.

- [15] H. O. Saldner, N.-E. Molin y E. V. Jansson, «Vibration modes of the violin forced via the bridge and action of the soundpost», *Journal of the Acoustical Society of America*, 1996.
- [16] J. Antunes y O. Inácio, eds., *A linearized modal analysis of the bowed string*, 2007.
- [17] C. C. Álvarez; Rubén Picó Vila; Samuel Quintana Gómez, «Análisis modal de la tapa superior de un violín con FEMLAB», *TecniAcústica*, 2006.
- [18] A. Carnicero. (2000). Introducción al método de los elementos finitos, dirección: https://www.iit.comillas.edu/carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf.
- [19] H. L. Helmholtz, *On the sensations on tone as a physiological basis for the theory of music*, eng, 2nd English ed., ép. Dover classics of science and mathematics. New York: : Dover, 1954, ISBN: 0486607534.
- [20] C. V. RAMAN, «On the "Wolf-note" of the Violin and Cello», *Nature*, vol. 97, 362 EP -, 1916. dirección: <https://doi.org/10.1038/097362a0>.
- [21] I. M. Firth y J. M. Buchanan, «The wolf in the cello», *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1973.
- [22] C. E. Gough, «The resonant responses of violin g-string and the excitation of the wolf tone», *Acustica*, 1980.
- [23] M. E. McIntyre, R. T. Schumacher y J. Woodhouse, «On the oscillations of musical instruments», *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1983.
- [24] L. Cremer, *The Physics of Violin*, C. MIT Press, ed. 1985.
- [25] A. Benade, *Fundamentals of Music Acoustics*, N. Y. Dover, ed. 1990.
- [26] G. H. Martín, «Análisis espectral del timbre de la trompa», Proyecto fin de carrera, uc3m, 2015.
- [27] (2019). Milo Stamm Ponticelli, dirección: <http://www.milostamm.com>.
- [28] F. Savart, *Des instruments de musique*. 1840.
- [29] M. Minnaert y C. Vlam, «The vibrations of the violin bridge», *Physica*, 1937.

- [30] B. Bladier, *Sur le chevalet du violoncelle*. 1960.
- [31] G. Steinkopf, «Tesis no publicada, descrita por Cremer», Technische Universität Berlin, 1963.
- [32] F. Reinicke, *Die Übertragungseigenschaften des Streichinstrumentens-
teges*. 1973.